

INTRODUCCIÓN

Introducción

La infiltración, comúnmente definida como la entrada de agua dentro del perfil del suelo en forma vertical, es un proceso de gran importancia práctica para el diseño y la evaluación del riego en la parcela, pues la capacidad de infiltración del suelo es la que determina la tasa con la que el agua puede ser aplicada a su superficie sin escurrimiento (para el caso de riego por aspersión) y, en el caso del riego por superficie, ayudará a encontrar la longitud más eficiente del surco, pues dependen de esta capacidad de infiltración. La falta de una adecuada consideración del proceso de infiltración puede resultar en una distribución de agua poco uniforme en la parcela, así como en una excesiva pérdida del agua debido a la percolación profunda o la escorrentía (Delgadillo, 2016).

El proceso de infiltración de agua en el suelo ha sido intensamente estudiado debido a su importancia en el manejo del agua en la agricultura, la conservación del recurso suelo, la recarga hacia los acuíferos y otras actividades técnicas. La velocidad de infiltración determina la cantidad de agua de escurrimiento superficial y con ello el peligro de erosión hídrica. En casi todos los métodos de riego la velocidad de entrada de agua al suelo determina los tiempos de riego y los diseños de los sistemas en cuanto al tamaño de las unidades superficiales y los caudales a utilizar. Además, el proceso de infiltración es de gran importancia práctica dado que su velocidad determina generalmente la cantidad de agua de escurrimiento, pudiendo detectarse así el peligro de erosión durante inundaciones o lluvias muy intensas. (Batres & Barahona 2017).

La infiltración es un parámetro que describe la tasa de agua que logra entrar al perfil del suelo. Este parámetro es variable tanto en espacio como en tiempo, debido a que está influenciado por la textura, porosidad, densidad aparente, contenido de materia orgánica, contenido de humedad inicial, compactación del suelo, profundidad del manto freático, y uso del suelo, entre otros. Existen ecuaciones empíricas simples para describir la infiltración en función del tiempo. En algunas ocasiones sus parámetros de ajuste no tienen un significado físico, por lo cual, no representan la infiltración real del suelo y no coinciden con los datos tomados en campo. (Ávila & otros 2019).

Antecedentes

La mayor parte del agua que las plantas utilizan para sus procesos fisiológicos proviene del suelo y con frecuencia el exceso o déficit de ella suele actuar como un factor limitante de su crecimiento. La velocidad de infiltración es el proceso que define la entrada y el movimiento, en general vertical, del agua a través de la superficie del suelo en una unidad de tiempo definida (cm/min o bien, mm/h). La velocidad a la que el agua penetra en el suelo es, en general, elevada al inicio de la infiltración debido a que el gradiente matricial de succión al inicio es elevado en las capas superficiales en particular cuando el suelo está seco, y esta velocidad tiende a decrecer a medida que transcurre el tiempo. (García & otros 2008).

(Leyva, 2019) Muestran que el Permeámetro de Guelph constituye una herramienta válida para la medición de conductividad hidráulica saturada (Kfs) para los vertisoles y otros suelos arcillosos agrietables, si se toman precauciones particulares; es una herramienta de uso estándar y su adopción permite comparar los valores de Kfs (conductividad hidráulica saturada) en suelos con distintas características texturales. Se ha comprobado la conveniencia del uso de carga hidráulica (H) altas, de 20 cm, para suelos de textura fina con altos contenidos de humedad.

La conductividad hidráulica estimado con el permeámetro Guelph según el tipo de suelo, tenemos que para suelos Limo Orgánico un mínimo 0.0061 m/día y máximo 0.0075 m/día, arcilla con Grava mínimo de 0.0534 m/día y un máximo 0.0649 m/día, Arcilla Inorgánica mínimo 0.0059 m/día y un máximo 0.0219 m/día y Arcilla Inorgánica mínimo 0.0071 m/día y un máximo 0.02290 m/día. Por lo que las tasas de conductividad hidráulica saturada responden al dato bibliográfico con diferencias mínimas por el tipo de suelo más específico. (Leyva, 2019).

Se comprobó que la medida de la Kfs con el método del permeámetro Guelph es una técnica sencilla y relativamente rápida, teniendo cada medida una duración aproximada de 30- 40 minutos, cuando se utilizan dos cargas hidráulicas. (Dafonte & otras 1999).

Descripción del problema

El Centro Experimental de Chocloca es un área dedicada a la investigación agrícola donde también se realizan estudios sobre las propiedades del suelo y su impacto en las prácticas de cultivo.

La variabilidad espacial de la tasa de infiltración del agua en el suelo es un factor importante que afecta la eficiencia del riego, la erosión del suelo y la recarga de acuíferos. En el Centro Experimental de Chocloca, se desconoce la magnitud de esta variabilidad, lo que dificulta la toma de decisiones para el manejo del suelo y el agua. La falta de conocimiento sobre la variabilidad espacial puede llegar a causar problemas en la eficiencia en el riego desconociendo la cantidad de agua necesaria para cada zona del predio, lo que puede llevar a la aplicación excesiva o insuficiente de agua provocando erosión en los suelos y la infiltración excesiva de agua en algunas zonas puede contaminar los acuíferos subyacentes.

La infiltración básica, que es la capacidad del suelo para absorber agua, varía según la permeabilidad, que es la facilidad con la que el agua se mueve a través del suelo. Esta relación es crucial para entender y mejorar las prácticas de irrigación y drenaje en los predios del Centro Experimental de Chocloca.

Una comprensión clara de cómo la variabilidad de la infiltración básica se relaciona con la permeabilidad del suelo puede llevar a una mejor gestión de los recursos hídricos, optimizar el uso del agua en la agricultura y prevenir problemas como la erosión y la degradación del suelo.

Los suelos del CECH son de origen aluvial y fluvio-lacustre, los primeros son de texturas media a finas, generalmente profundos. En cambio, los suelos de la zona colinosa de origen fluvio-lacustre tienen profundidad variable, de textura finas a medias, gravosos y muy susceptibles a procesos de erosión hídrica. (Segovia, 2016)

La variabilidad en la infiltración del suelo es un factor crítico para el manejo sostenible de los recursos hídricos y la agricultura. En el Centro Experimental de Chocloca, se carece de información sobre la infiltración básica y la permeabilidad en los suelos del

CECH. La Permeabilidad es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración. El tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). El tamaño y el número de los poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad. Sin embargo, aún no se ha realizado una evaluación completa de la variabilidad espacial y temporal de la infiltración en estos predios.

Por lo tanto, el problema de investigación se plantea de la siguiente manera.

Planteamiento del problema

¿La variabilidad de la infiltración básica y la permeabilidad del suelo en los predios del Centro Experimental de Chocloca, afectan de forma directa la disponibilidad de agua?

Justificación

El análisis de la infiltración de agua en el suelo es imprescindible, en este contexto, para el planteamiento racional de las actividades agropecuarias y, en particular, para el uso de modelos matemáticos de predicción de erosión y contaminación con objeto de diseñar escenarios de uso del suelo, compatibles con la conservación del medio ambiente. El estudio de esta propiedad física del suelo, y de su variabilidad espacial, es también fundamental para el estudio de las interacciones del sistema suelo-agua.

El respectivo estudio permitirá determinar la infiltración básica y la permeabilidad en los suelos del centro experimental de chocloca mediante el uso del infiltrómetro de doble anillo y el permeámetro de GUELPH. Esto con el fin de identificar cual es el grado de aproximación en los datos obtenidos usando estos dos métodos.

De tal manera que los datos obtenidos con el permeámetro nos servirán para corroborar los datos de la infiltración básica usando el infiltrómetro, con el fin de obtener datos más confiables que nos permitan la implementación de estrategias y técnicas sobre el riego y el drenaje presente en el lugar de estudio, lo que repercutirá en un mejor desempeño productivo y rentabilidad de los cultivos.

Esta investigación va a servir como un referente para incentivar investigaciones en riego y drenaje, puesto que también nos permitirá brindar recomendaciones a los estudiantes que realizan prácticas en las diferentes parcelas del CECH.

Objetivo General

Evaluar la variabilidad de la infiltración del suelo en los predios del Centro Experimental de Chocloca, mediante el uso de infiltrómetro de doble anillo y permeámetro de Guelph para mejorar las prácticas de manejo del suelo y optimizar el uso del agua.

Objetivos específicos

- Medir la tasa de infiltración en diferentes puntos o predios de la estación utilizando el infiltrómetro de doble anillo.
- Determinar la permeabilidad del suelo mediante el uso del permeámetro.
- Analizar la variabilidad espacial de la infiltración y la permeabilidad e identificar las áreas con diferente capacidad de infiltración y proponer medidas de manejo adecuado.
- Comparar los resultados obtenidos con el infiltrómetro y el permeámetro mediante la aplicación de modelos matemáticos.

Hipótesis

No existe una variabilidad significativa en los resultados de la infiltración básica mediante el uso del infiltrómetro de doble anillo y el permeámetro en los suelos del predio del Centro Experimental de Chocloca.

CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo. La tasa de infiltración, en la ciencia del suelo, es una medida de la tasa a la cual el suelo es capaz de absorber la precipitación o la irrigación. Se mide en pulgadas por hora o milímetros por hora. Las disminuciones de tasa hacen que el suelo se sature. Si la tasa de precipitación excede la tasa de infiltración, se producirá escurrimiento a menos que haya alguna barrera física. Está relacionada con la conductividad hidráulica saturada del suelo cercano a la superficie. La tasa de infiltración puede medirse usando un infiltrómetro. La infiltración está gobernada por dos fuerzas: la gravedad y la acción capilar. Los poros muy pequeños empujan el agua por la acción capilar además de contra la fuerza de la gravedad. La tasa de infiltración se ve afectada por características del suelo como la facilidad de entrada, la capacidad de almacenaje y la tasa de transmisión por el suelo. (Úbeda & Delgado, 2018).

Proceso de infiltración

El proceso de infiltración puede continuar sólo si hay espacio disponible para el agua adicional en la superficie del suelo. El volumen disponible para el agua adicional depende de la porosidad del suelo y de la tasa a la cual el agua antes infiltrada puede alejarse de la superficie a través del suelo. La tasa máxima a la que el agua puede entrar en un suelo se conoce como capacidad de infiltración. Si la llegada del agua a la superficie del suelo es menor que la capacidad de infiltración, toda el agua se infiltrará. Si la intensidad de precipitación en la superficie del suelo ocurre a una tasa que excede la capacidad de infiltración, el agua comienza a estancarse y se produce la escurrimiento sobre la superficie de la tierra. (Pérez 2008).

Velocidad de la infiltración

La velocidad a la que el agua penetra en el suelo es, en general, elevada al inicio de la infiltración debido a que el gradiente matricial de succión al inicio es elevado en las capas superficiales en particular cuando el suelo está seco, y esta velocidad tiende a decrecer a medida que transcurre el tiempo. La velocidad de infiltración es afectada

por las características del perfil edáfico, como la textura, la estructura, la cantidad de materiales orgánicos e inorgánicos, así como por el tamaño y volumen total del espacio poroso, la presencia de raíces de las plantas es un factor determinante para incrementar el espacio poroso del suelo y, a su vez, aumentar la permeabilidad (García & otros 2008).

La velocidad de infiltración puede definirse como la capacidad de admisión de agua de un terreno desde la superficie al interior del mismo. En otros términos, es la relación entre la lámina de agua infiltrada y el tiempo que tarda en infiltrarse esa lámina. Comúnmente suele expresarse en cm/h o mm/h. (Delgadillo, 2016).

Infiltración instantánea

La velocidad de infiltración no es uniforme, tiende a disminuir mientras transcurre el tiempo desde que comienza la aplicación de agua en el suelo cuando ésta es continua. Si se grafican las velocidades registradas en función del tiempo transcurrido, se obtendrá una curva que puede ser adecuadamente descrita mediante el modelo potencial de la ecuación 1. Si, a su vez, se grafica este modelo potencial, se obtendrá la curva representativa de la velocidad de infiltración. La velocidad de infiltración instantánea es el valor puntual obtenido en un tiempo determinado, cuando se introduce este último en la curva representativa. Este modelo fue propuesto por Kostiakov en 1932. Es evidente que existen otros modelos desarrollados para representar la infiltración en el suelo, sin embargo, la ecuación de infiltración propuesto por Kostiakov ha resultado muy útil y práctica para aplicación con fines de riego. (Delgadillo, 2016).

Ecuación 1: según (Kostiakov, 1932)

$$I = at^b$$

Donde:

I = Velocidad de infiltración, expresada en cm/min, mm/h, etc.

t = Tiempo de oportunidad (tiempo de contacto del agua con el suelo) expresado en minutos u horas.

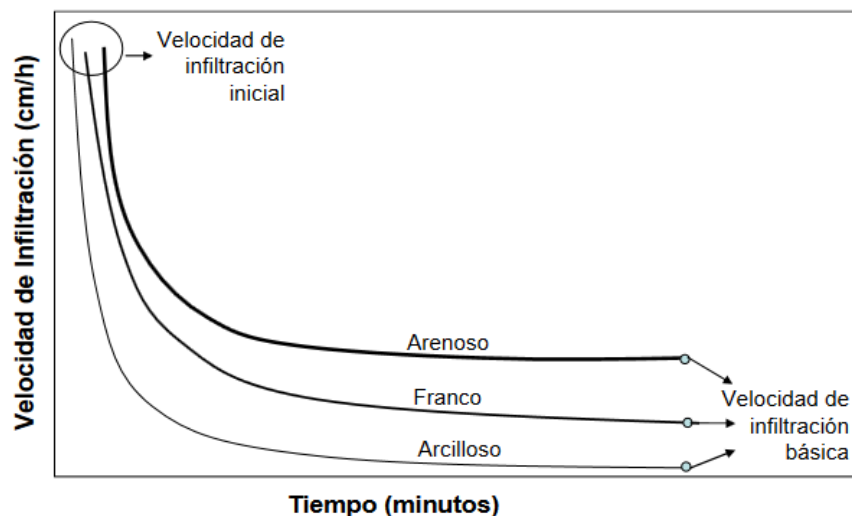
a = Coeficiente que representa la velocidad de infiltración para el intervalo inicial de tiempo.

b = Exponente adimensional que varía de acuerdo a las características del suelo entre 0 y -1.

Infiltración básica

Inicialmente, al aplicar agua, el valor de infiltración es alto y, a medida que se incrementa el contenido de agua en el suelo, disminuye paulatinamente hasta llegar a un valor constante denominado velocidad de infiltración básica. El SCS (Servicio de conservación de suelos) del USDA define a la infiltración básica I_b como el valor instantáneo de la velocidad de infiltración cuando la tasa de cambio, para un período estándar, es el 10 % o menos de la velocidad de infiltración. Generalmente se considera del tiempo que se alcanza la infiltración básica cuando la velocidad de infiltración se hace constante respecto del tiempo. (Génova, 2017).

Figura 1. Variación de la curva de velocidad de infiltración por la textura del suelo



Fuente:(Delgadillo, 2016).

Para tener una referencia se muestran rangos de infiltración básica para los diferentes tipos de suelo.

Cuadro 1. Rangos de velocidad de infiltración básica de los diferentes tipos de suelo

Tipo de suelo	mm/h
Arenoso	Más de 30
Franco arenoso	20-30
Franco	10-20
Franco arcilloso	5-10
Arcilloso	1-5

Fuente:(Delgadillo, 2016).

Factores que afectan a la capacidad de infiltración

Entre los factores que influyen en la velocidad o tasa de infiltración que son fácilmente observables, se pueden mencionar: el contenido inicial de humedad del suelo, relacionado inversamente con la tasa de infiltración; la textura y estructura del suelo; la condición de superficie (suelo desnudo, con presencia de costra, o existencia de vegetación); cantidad de materia orgánica; temperatura del suelo y calidad del agua aplicada. (Landini & otros 2007)

Características del Suelo

Entre mayor sea la porosidad, el tamaño de las partículas y el estado de fisuramiento del suelo, mayor será la permeabilidad y por lo tanto también mayor capacidad de infiltración. La textura del suelo influye por sí y por su influencia en la estabilidad de la estructura, en forma tanto menor cuanto mayor sea la proporción de materiales finos que contenga. Un suelo con gran cantidad de limos y arcillas, está expuesto a la disgregación y arrastre de estos materiales por el agua, con el consiguiente llenado de poros más profundos. La estructura define el tamaño de los poros. La existencia de poros grandes reduce la tensión capilar, pero favorece directamente la entrada de agua y el calor específico del terreno influirá en su posibilidad de almacenamiento de calor,

afectando a la temperatura del fluido que se infiltra, y, por lo tanto, a su viscosidad. El aire que llena los poros libres del suelo, tiene que ser desalojado por el agua para ocupar su lugar, lo que reduce la intensidad de la infiltración, hasta que es desalojado totalmente. (Satlari, 2011)

Grado de Humedad del suelo

La infiltración varía en proporción inversa a la humedad del suelo, es decir, un suelo húmedo presenta menor capacidad de infiltración que un suelo seco. La humedad inicial del suelo tiene una importancia capital en el proceso. Cuando el suelo se halla seco al comienzo de la lluvia, se crea una fuerte capilaridad al humedecerse las capas superiores, efecto que se suma al de gravedad, incrementando la intensidad de infiltración. A medida que el suelo se humedece, las arcillas y coloides se hinchan por hidratación, cerrando los vacíos y disminuyendo en consecuencia la capacidad de infiltración. Cuando un suelo tiene completa su capacidad de absorción de agua al comenzar la precipitación, resulta evidente que la cantidad de agua que admitirá será mucho menor. (Huaman, 2016).

Acción de la precipitación sobre el suelo.

El agua de lluvia al chocar con el suelo facilita la compactación de su superficie disminuyendo la capacidad de infiltración; por otra parte, el agua transporta materiales finos que tienden a disminuir la porosidad de la superficie del suelo, humedece la superficie, saturando los horizontes más próximos a la misma, lo que aumenta la resistencia a la penetración del agua. (Huaman, 2016).

Cubierta vegetal.

Un aspecto importante es la cobertura vegetal, al respecto que tiene una gran incidencia en las tasas de infiltración, debido a la tendencia a la formación de costras superficiales en los tratamientos sin cubierta. La presencia de cobertura es importante para controlar la escorrentía, favoreciendo la infiltración. (Soza & otros 2018).

Acción del hombre y de los animales.

El suelo virgen tiene una estructura favorable para la infiltración, alto contenido de materia orgánica y mayor tamaño de los poros. Si el uso de la tierra tiene buen manejo y se aproxima a las condiciones citadas, se favorecerá el proceso de la infiltración, en caso contrario, cuando la tierra está sometida a un uso intensivo por animales o sujeto al paso constante de vehículos, la superficie se compacta y se vuelve impermeable.(Eleazar, 2010).

Temperatura.

Un aumento de la temperatura del agua produce disminución en su viscosidad y aumento en la velocidad de infiltración del agua. En las zonas tropicales la temperatura del suelo varía muy poco a lo largo del año y la temperatura del agua en contacto con este varía poco. Lo anterior hace que las propiedades físicas del fluido en las zonas tropicales no afecten apreciablemente la infiltración. (Megia & otro 2001).

Características del terreno o medio permeable

Dentro de este apartado nos encontraríamos con dos grupos: las propiedades del suelo y las condiciones del suelo

Propiedades del suelo: Entre las propiedades del suelo que afectan a la infiltración encontraríamos la textura (las texturas más gruesas normalmente permiten una mayor infiltración), el tipo de arcilla, la estructura del suelo (formación de agregados) y el contenido de materia orgánica. El suelo se estructura en diferentes horizontes o capas, de manera que la capa superficial u horizonte A presenta un contenido en materia orgánica superior al de los horizontes subyacentes. Este horizonte posee propiedades asociadas al manejo del suelo, como son la labranza, el tipo de vegetación o cultivo y la rotación. Los horizontes subyacentes poseen un menor contenido de materia orgánica. (Ruiz, 2016).

Textura: La textura del suelo determina la velocidad a la que el agua drena a través de un suelo saturado, el agua se mueve más libremente a través de los suelos arenosos que a través de los suelos arcillosos. Una vez que se alcanza la capacidad de campo, la

textura del suelo también influye en la capacidad de agua disponible para la planta, los suelos arcillosos tienen una mayor capacidad de retención de agua que los suelos arenosos. (Laboratorio CSR, 2019).

Condiciones del suelo: Además de un conocimiento general del tipo de suelo, en muchas ocasiones también se requiere un conocimiento más específico de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Entre estas propiedades se encuentran las siguientes:

Compactación: La compactación reduce la velocidad de infiltración de agua, causa disminución en el drenaje, reduce la disponibilidad de agua y abastecimiento de aire y oxígeno utilizado por las raíces. La compactación viene dada especialmente cuando se trabaja con maquinaria pesada sobre suelo mojado. Sin embargo, a escala mundial el exceso de pastoreo es la principal causa de compactación del suelo. (Díaz, 2018).

Estructura del suelo: las partículas del suelo tienden a unirse en estructuras mayores llamadas agregados, creándose entre agregados espacios mayores y favoreciendo en mayor medida la infiltración. Estos agregados pueden disgregarse o romperse por efecto de la compactación. (Ruiz, 2016).

Materia orgánica: La materia orgánica en el suelo funciona como hidro retenedor, su desprendimiento de los coloides orgánicos que atraen las moléculas de agua y las conservan para cuando un organismo vivo la necesite. Ésta favorece la absorción de humedad y la creación de espacios mayores por los cuales el agua circula con mayor facilidad. (Úbeda & otros 2018).

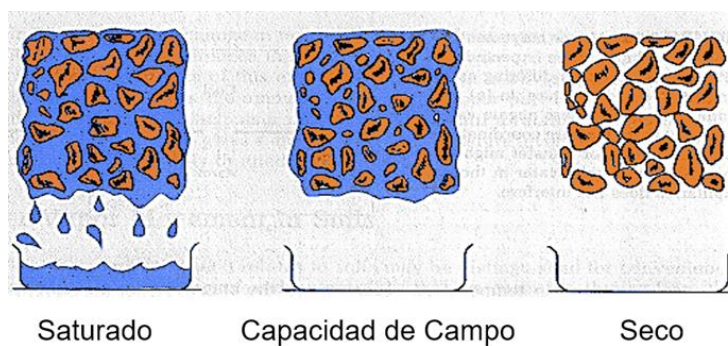
Capacidad de campo

Después de una lluvia abundante el agua llega a ocupar todos los poros del suelo. Se dice entonces que el suelo está saturado. A continuación, el agua tiende a moverse por gravedad hacia el subsuelo, hasta llegar a un punto en que el drenaje es tan pequeño que el contenido de agua del suelo se estabiliza. Cuando se alcanza este punto se dice que el suelo está a la Capacidad de Campo (C.C.). Buena parte del agua retenida a la C.C. puede ser utilizada por las plantas, pero a medida que el agua disminuye se llega

a un punto en que la planta no puede absorberla. En este estado se dice que el suelo está en el punto de marchitez. La diferencia entre la C.C. y el punto de marchitez representa la fracción de agua útil (disponible) para el cultivo. Cuanto más fina es la textura mayor son los porcentajes de agua en el suelo, tanto a la C.C. como en el punto de marchitez. Una buena estructura del suelo también aumenta la fracción de agua útil (Tecnicoagricola, 2018).

La capacidad de campo se define como la cantidad de agua que un suelo puede retener después de que el exceso de agua ha drenado por gravedad, pero antes de que las plantas comiencen a experimentar sequía. En este estado, el suelo está bien saturado y las fuerzas capilares mantienen agua en sus poros; esta agua es accesible para las plantas. La capacidad de campo es un indicador importante para la gestión del riego y la determinación de cuándo y cuánta agua adicional puede necesitar un cultivo. La capacidad de campo puede variar según el tipo de suelo, su estructura y composición. (Moreno, 2024).

Figura 2. Suelo saturado y suelo seco



Fuente (Tecnicoagricola, 2018).

Métodos para medir la infiltración

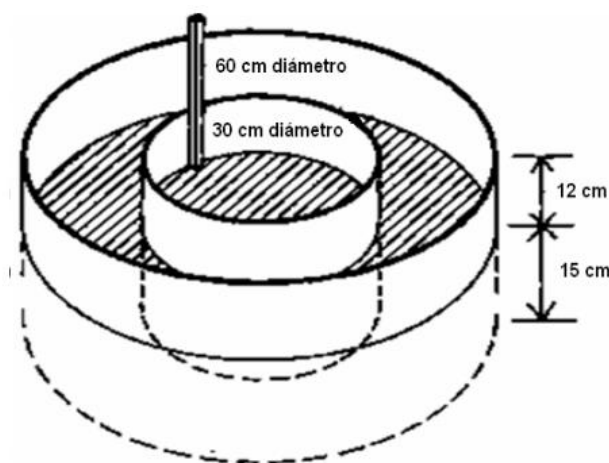
Para una predicción del movimiento de agua en el suelo se requiere una medición cuidadosa de los parámetros hidráulicos del suelo. Para ello se han desarrollado una serie de métodos de laboratorio y campo; sin embargo, hay que considerar que estos

métodos presentan problemas con la variabilidad espacial, la exactitud de los procedimientos y la escala de medición. (Gabriels & otros 2006).

Infiltrómetro de doble anillo

Consiste de dos cilindros separados, usados para determinar la tasa de infiltración, la infiltración acumulada y la conductividad hidráulica saturada. Es un método sencillo que puede ser usado para evaluar estos valores en los diferentes horizontes del suelo. Los dos cilindros concéntricos son instalados con el propósito de reducir el flujo lateral en el cilindro interno. La tasa de infiltración en el cilindro interno se asume que sea una indicación del flujo vertical. Consiste en enterrar parcialmente un anillo de diámetro en el suelo y colocar una lámina de agua de inundación constante o variable dentro de él. Se mide cuánta agua penetra en el suelo por unidad de área y tiempo. Durante la medición es necesario tener cuidado de que la carga de agua en el interior y fuera del cilindro o anillo sea igual; de lo contrario puede ocurrir flujo lateral entre los dos anillos. Ambos anillos deben enterrarse hasta una profundidad de al menos 10 cm para reducir el flujo lateral a un mínimo. Normalmente toma largo tiempo antes de que la tasa de infiltración se haga constante. El resultado, aunque no siempre exacto, da una aproximación buena de la situación del campo. (Gabriels & otros 2006).

Figura 3. Infiltrómetro de doble anillo



Fuente: (Storti, S/F)

Modelos matemáticos que explican la infiltración

En el campo de la Física de Suelos, han sido deducidas ecuaciones diferenciales de flujo, para explicar la infiltración, a partir de las leyes de difusión de masa. Estas ecuaciones generalmente son de escasa aplicabilidad en tecnología de riego, ya que requieren determinaciones de laboratorio rigurosas. Por otro lado, existen metodologías de campo sencillas y de bajo costo, que permiten caracterizar la infiltración adecuadamente, utilizando la información generada para la construcción de ecuaciones que explican el fenómeno en las condiciones experimentales cercanas a las que ocurren en el campo real, con aceptables resultados. Estos métodos requieren de modelos matemáticos y técnicas estadísticas, con los cuales realizar el ajuste de los datos de campo y elaborar las propias ecuaciones, referentes a las situaciones experimentales planteadas. (Génova L. & otros 2017).

El modelo más ampliamente utilizado para caracterizar la infiltración, es el de Kostiakov (1932), modificado por Lewis (1979), que es:

$$I = k \cdot t^n \quad (1)$$

Donde:

I = velocidad de infiltración, en cm/h.

k = factor numérico adimensional, pero que representa la velocidad de infiltración en cm/min durante el intervalo inicial, se obtiene analítica o gráficamente y es el parámetro del ajuste de los datos de campo al modelo.

n : exponente que varía entre 0 y -1 . Representa la tasa de cambio de la variable dependiente (I) respecto de la variable independiente (t), explicando la disminución de la I con el t . Cuando se grafican los datos de campo y se ajustan al modelo, es la pendiente de la curva de ajuste.

t = tiempo de infiltración, en minutos.

Una imprecisión del modelo (1) es que al aumentar el tiempo t , el valor de I tiende a cero, lo cual no explica la verdadera tendencia del fenómeno, conocido por abundante experimentación. El USDA modificó la ecuación (1) proponiendo: (Génova L. & otros 2017).

Permeabilidad del suelo

La permeabilidad es la propiedad del suelo que permite que el agua y otros fluidos se desplacen a través de sus vacíos interconectados. Esta propiedad es esencial, ya que afecta la cantidad de agua que un suelo puede retener y mover a través del terreno. Siendo una propiedad clave para múltiples aplicaciones desde la agricultura hasta la ingeniería. El agua puede fluir desde las áreas de mayor energía hacia las de menor energía y la velocidad de este flujo se cuantifica mediante el coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica, denotado por la letra k . Esta propiedad es fundamental para entender cuánta agua puede retener un suelo y cómo se mueve a través del terreno. (Gavidia, 2023).

La permeabilidad depende de varios factores, dentro de los que se encuentra la viscosidad del fluido y de las propiedades del terreno, como:

- Tamaño de las Partículas: Suelos con partículas grandes permiten un flujo más rápido debido a los espacios más grandes entre ellas.
- Distribución Granulométrica: La disposición de diferentes tamaños de partículas también juega un papel crucial. Una mezcla bien equilibrada puede generar un suelo más permeable.
- Compacidad: Cuanto más compacto sea un suelo, menos espacios habrá para que el agua fluya, lo que disminuye su permeabilidad.
- Grado de Saturación: Un suelo saturado de agua puede tener una permeabilidad diferente a un suelo parcialmente saturado, ya que los espacios ya pueden estar ocupados por agua. (Gavidia, 2023).

Variación de la permeabilidad según la textura del suelo

Por regla general, como se muestra a continuación, mientras más fina sea la textura del suelo, más lenta será la permeabilidad. (Armijo 2017).

Cuadro 2. Variación de la permeabilidad según la textura del suelo

Suelo	Textura	Permeabilidad
Suelo arcillosos	Fina	De muy lenta a muy rápida
Suelos limosos	Moderadamente fina	
	Moderadamente gruesa	
Suelos arenosos	Gruesas	
Permeabilidad media para diferentes texturas de suelo en cm/hr		
Arenoso		5.00
Franco arenoso		2.50
Franco		1.30
Franco arcilloso		0.80
Arcilloso limoso		0.25
Arcilloso		0.05

Fuente: (Armijo 2017).

Clases de permeabilidad del suelo

La permeabilidad del suelo suele medirse en función de la velocidad del flujo de agua a través de éste durante un período determinado. Generalmente se expresa o bien como una tasa de permeabilidad en centímetros por hora (cm/h), milímetros por hora (mm/h), o centímetros por día (cm/d), o bien como un coeficiente de permeabilidad en metros por segundo (m/s) o en centímetros por segundo (cm/s). (Armijo 2017).

Cuadro 3. Coeficientes de permeabilidad

Tipo de suelos	Grado relativo de Permeabilidad	Coeficiente de Permeabilidad K (cm/s)	Propiedades de drenaje
Grava limpia	Alto	IE-01	Buena
Arena limpia	Medio	IE-03	Buena
Grava arenosa	Medio	IE-03	Buena
Arena fina	Bajo	IE-3 a IE-5	Franca a pobre
Limos	Bajo	IE-3 a IE-6	Franca a pobre
Arena limo arcilloso	Muy bajo	IE-4 a IE-7	Pobre a prácticamente Impermeable
Arcilla homogénea	Muy bajo a Prácticamente Impermeable	IE-07	Pobre a prácticamente Impermeable

Fuente: (Armijo 2017).

Métodos de medición de la permeabilidad

Existen varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos, los podemos dividir básicamente en dos grupos: los “directos”, porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición del coeficiente de permeabilidad, y otros “indirectos”, ya que proporcionan el valor del coeficiente de permeabilidad en forma secundaria, es decir, por medio de pruebas y técnicas diseñadas para otros fines. (Camargo 2015).

Los métodos son los siguientes:

a. Directos:

- Permeámetro de carga constante.
- Permeámetro de carga variable.
- Prueba directa en los suelos en el lugar.

b. Indirectos:

- Cálculo a partir de la curva granulométrica.
- Cálculo a partir de la prueba de consolidación.
- Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad.

Permeámetro Guelph

Este medidor es un instrumento en el que se determina un valor de carga hidráulica constante y se miden los descensos de esta en un tiempo determinado, este método es fundamentado en las ecuaciones de la ley de Darcy. El permeámetro de carga constante es un método a nivel de matriz de suelo. Mientras el agua fluye en el suelo, la cantidad de agua en los reservorios del equipo desciende, manteniendo estable la altura del agua en el pozo. Esta velocidad de descenso es registrada por medio de una escala graduada a 0,1 cm, en intervalos constantes de tiempo, y permite las lecturas correctas aún a muy bajos caudales. Cuando las velocidades de descenso se estabilizan y se obtienen 3 a 4 valores iguales o con diferencias menores al 5% se termina la medición. Para la determinación la permeabilidad es necesario realizar la perforación un orificio en el suelo de 15 cm de profundidad y se llena el depósito de agua cerrándolo para crear el vacío, luego se introduce el cilindro de menor diámetro en el orificio del suelo y se abre el émbolo de la parte superior para luego realizar lecturas del flujo de dos cargas hidráulicas constantes, de 5 y 10 cm. (Alvarado, 2020).

El método de cálculo utilizado para determinar la infiltración es:

$$k_s = \frac{C.Q}{2\pi H^2 . \pi a^2 C . 2\pi \frac{H}{a^2}} \times Q$$

Donde:

C: Factor de forma adimensional (Características del suelo)

Q: Caudal de agua medido.

H: Carga hidráulica del orificio.

A: Diámetro del pozo (cm)

Fuente: (Reynolds & otros, 1986)

Cuadro 4. Valores de alfa recomendados por Reynolds para suelos según estructura y porosidad.

Valor α	Características del suelo
0.01	Para suelos compactados, no estructurados o depósitos arcillosos lacustres o marinos
0.04	Para suelos de texturas finas, arcillas no estructuradas
0.12	Para suelos estructurados, arcillosos a franco arenas finas no estructuradas
0.36	Para suelos de texturas gruesas, arenosos o gravilloso, suelos muy estructurados.

Fuente: (Leyva 2019).

Instalación del permeámetro Guelph

El permeámetro de Guelph se lo instala en un pozo perforado a 25 cm de profundidad con un radio de 3 cm y una carga constante de 10 cm. Se inserta el trípode en la base y luego se colocó la cadena de seguridad a través de los orificios que se encuentran en cada una de las patas. Se conecta el tubo de aire inferior con el tubo de aire medio, mediante las conexiones de goma diseñada para unir los dos tubos. Se presiona firmemente el tubo de aire inferior contra la conexión hasta quedar lo más firme posible. Luego con el cojinete del trípode en su lugar, se desliza el tubo de soporte dentro del trípode y se lleva el soporte deslizante hasta ajustarlo en la base del trípode. Se acento la escala de pozo sobre el tubo de entrada de aire superior contra el fondo de la tapa del depósito. Una vez que se arma el permeámetro, se procede a instalar dentro del pozo y llenar con agua los reservorios interno y externo, tomando en cuenta que la válvula este en posición (abierto) para llenar ambos reservorios a su nivel máximo o inicial. (Solórzano 2023).

Toma de lecturas del permeámetro

Antes de tomar las lecturas con el equipo (PG) se debe verificar que la válvula esté en posición (cerrado) para trabajar con el depósito interno. Se levanta el tubo de aire de la

cabeza del pozo lentamente a una altura de 10 cm de carga, esto da inicio al agua a descender y estar en contacto con el suelo, a su vez tomamos tiempo con el cronómetro para registrar la primera lectura inicial donde se obtienen las lecturas del nivel del agua en centímetros (cm) que marca en el tubo interno de mariotte. La primera lectura de 2 minutos es de prueba para observar la tasa de caída de agua que se tiene en ese suelo, se observa si existe un cambio en el nivel de agua muy rápido dentro del depósito interno, para proceder a colocar la válvula en posición (abierto) para obtener la combinación de depósitos (interno o externo) y observar un cambio de nivel del agua más lento y así se realiza las pruebas de intervalo de tiempo de larga duración. Ya establecido el método de depósitos (combinado o interno), se procede a tomar las lecturas del tubo para registrar en una planilla, donde se obtienen la duración de intervalos de tiempo de 2, 5 y 10 (min) y las lecturas del nivel del agua inicial y final se las registraban en centímetros (cm). Al momento de recargar agua en los depósitos bajamos el tubo de aire de la cabeza del pozo para suspender la prueba y colocamos la válvula en posición (abierto) para proceder a realizar la recarga de agua necesaria hasta su nivel máximo o inicial (0 cm). (Solórzano 2023).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

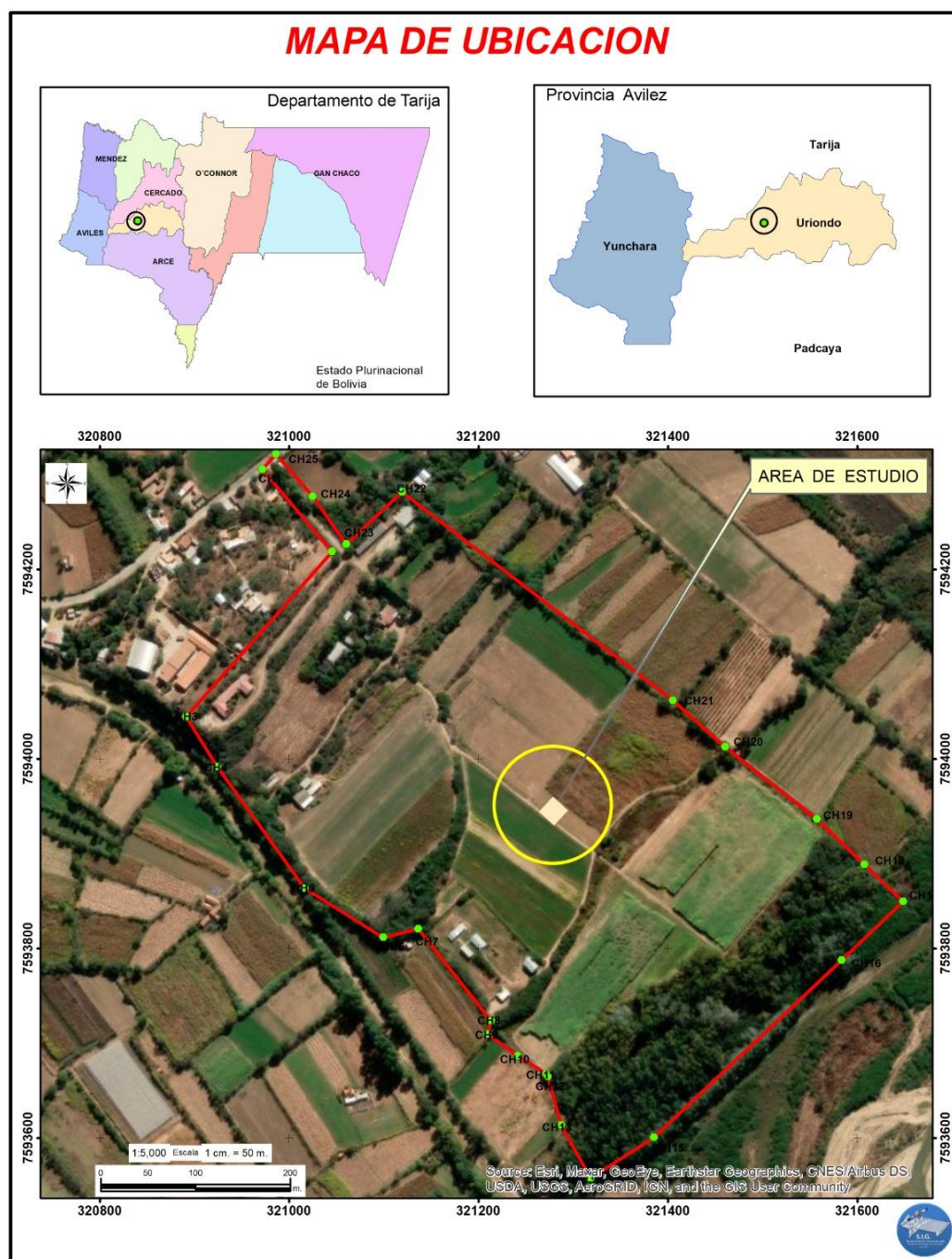
Localización

El presente trabajo de investigación se realizó en el Centro Experimental de Chocloca (CECH), que es propiedad de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Ubicada en el municipio de Uriondo Provincia avilés del departamento de Tarija, que está a una distancia de 45 Km de la ciudad de Tarija.

Ubicación

Geográficamente se encuentra entre las coordenadas $21^{\circ} 44' 53''$ de latitud Sur y $64^{\circ} 43' 46''$ de longitud Oeste, a una altura de 1795 msnm. El (CECH) se encuentra limitado al Noroeste con la carretera vecinal, al suroeste con la quebrada el Huayco, al Este con propiedades privadas y al Sureste con el río Camacho (Zelaya 2017).

Figura 4. Mapa de ubicación del Centro Experimental de Chocloca (C.E.CH)



Características agroclimáticas.**Clima**

- Precipitación media anual: 657,6 mm.
- Temperatura Max. Media: 25,8°C.
- Temperatura min. Media: 9,5°C.
- Humedad relativa: 67,8%.

Cuadro 5. Datos Agrometeorológicos

DATOS AGROMETEOROLÓGICOS

Estación: Chocloca	Latitud Sud: 21° 44' 53"
Departamento: Tarija	Longitud Oeste: 64° 43' 46"
Provincia: Avilés	Altitud m/s/n/m: 1795
Serie Climática: 1975 – 2022	

PARÁMETROS METEOROLÓGICOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	EP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MÁXIMA ABSOLUTA (°C)	36,5	35,0	35,0	36,0	34,0	35,0	36,0	37,0	37,0	37,5	39,5	37,0	39,5
TEMPERATURA MÍNIMA ABSOLUTA (°C)	9,0	6,0	6,0	1,0	-4,0	-7,0	-8,5	-5,5	-4,0	0,0	4,0	3,0	-8,5

TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA (°C)	27,2	26,6	25,9	25,5	24,2	25,2	23,8	25,5	25,6	26,7	26,7	27,2	25,8
TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA (°C)	14,7	14,1	13,6	10,8	6,1	2,3	1,9	4,2	7,3	11,4	13,3	14,5	9,5
TEMPERATURA MEDIA (°C)	21,0	20,4	19,8	18,1	15,2	13,8	12,9	14,9	16,5	19,1	20,0	20,8	17,7
AMPLITUD TÉRMICA (°C)	12,5	12,5	12,3	14,7	18,1	22,9	21,9	21,3	18,4	15,2	13,3	12,7	25,3
FRECUENCIA DE HELADAS (Días)	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	10,3	10,1	5,4	1,4	0,1	0,0	0,0	30,7
HUMEDAD RELATIVA MEDIA (%)	71,4	75,5	75,7	72,0	67,1	60,9	60,9	61,7	60,6	65,6	71,1	70,8	67,8
EVAPORACIÓN TOTAL (mm)	124,3	115,6	118,7	97,6	84,7	78,9	85,4	120,5	137,4	157,2	137,6	137,3	1395,2
INSOLACIÓN TOTAL (Hrs./Sol)	176,3	149,5	150,9	187,5	195,1	200,7	198,0	226,6	184,5	196,2	203,1	155,7	2224,1
NUBOSIDAD MEDIA (Octas)	5,0	5,0	5,0	4,0	3,0	2,0	2,0	2,0	3,0	4,0	5,0	5,0	3,8
PRECIPITACIÓN TOTAL (mm)	138,3	112,4	106,5	29,3	4,2	1,1	1,2	4,3	13,0	49,1	81,0	117,2	657,6
PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 Hrs. (mm)	165,0	59,0	85,5	27,5	16,8	9,5	16,2	21,0	66,0	66,5	57,7	55,0	165,0
FRECUENCIA DE PRECIPITACIÓN (Días)	11,6	10,2	9,9	4,0	1,2	0,4	0,4	0,8	2,1	5,6	8,3	10,1	64,6

FRECUENCIA DE GRANIZADAS (Días)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DIRECCIÓN Y VELOCIDAD MEDIA DE VIENTO (Dir-Km/h)	E 7.0	E 7.3	E 6.8	NE 7.1	S 8.1	N 8.1	N 8.8	N 8.6	E 9.2	E 9.0	E 7.9	E 7.2	N 7.7

INDICES AGROMETEOROLOGICOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA DIURNA (°C)	23,8	23,5	23,2	22,7	21,5	22,4	20,9	22,0	21,9	23,0	23,1	23,6	22,6
TEMPERATURA NOCTURNA (°C)	18,2	17,3	16,4	13,5	8,9	5,2	4,9	7,8	11,1	15,2	16,9	18,0	12,8
UNIDADES CALOR, BASE: 10 °C	341,0	291,2	303,8	243,0	161,2	114,0	89,9	151,9	195,0	282,1	300,0	334,8	2807,9
UNIDADES FOTOTÉRMICAS, BASE: 10 °C	450,1	369,8	367,6	279,5	177,3	122,0	97,1	170,1	230,1	352,6	390,0	445,3	3451,5
HORAS FRÍO (Hrs.)	0,0	0,0	0,0	0,0	51,6	91,5	117,2	60,2	14,5	0,0	0,0	0,0	335,0

RADIACIÓN SOLAR (Cal/Cm2/día)	446,7	421,4	370,7	361,7	311,8	295,3	299,0	365,8	385,5	433,3	476,1	427,5	382,9
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (mm)	126,5	109,8	105,4	84,2	73,9	66,2	69,8	90,4	101,9	124,5	123,1	132,2	1207,9

Fuente (Estación Meteorológica Chocloca, 2022)

Precipitación

La precipitación media anual es de 657,6 mm de acuerdo a la frecuencia de precipitaciones en la zona en la cual se puede diferenciar dos fases durante el año la fase de escasas de agua corresponde a los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y la fase de lluvias corresponde a los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo, abril.

Vientos

Los vientos en la comunidad tienen incidencia al finalizar el invierno en el mes de agosto y al comienzo de la primavera (Zelaya 2017).

Geología

Según la carta geológica de Bolivia Hoja 6628 Padcaya (citado por Segovia 2016). El territorio del CECH, corresponde al sistema geológico del cuaternario, representado en la cuenca, por los siguientes depósitos:

Depósitos aluviales (Qa)

Formado por materiales sueltos principalmente cantos, gravas y arenas que forman el plano inundable o lecho del río Camacho y Quebrada El Huayco.

Depósitos Fluviales (Qcf)

Formados por arenas, limos, arcillas y gravas depositadas por la dinámica fluvial del río Camacho y la quebrada El Huayco, formando una sucesión de terrazas aluviales, caracterizan la mayor superficie del CECH.

Depósitos Fluvio – Lacustre (Qfl)

Localizados en el sector Oeste del CECH, constituidos por limo, arcilla, arenas y grava sedimentados en un ambiente de lago, conformando el relieve más inclinado del CECH, que forma parte de los depósitos fluvio-lacustres del Valle Central de Tarija.

Geomorfología del CECH

Se puede diferenciar las siguientes zonas o unidades geomorfológicas:

Zona de río.- Comprende el lecho del río formado por barra de cauce y el lecho menor del río Camacho sujeto a la dinámica aluvial del citado río.

Zona aluvial.- Comprende una serie de terrazas aluviales altas, medias y bajas conformando una llanura aluvial formada por un proceso de sedimentación por la dinámica fluvial de las aguas del río Camacho.

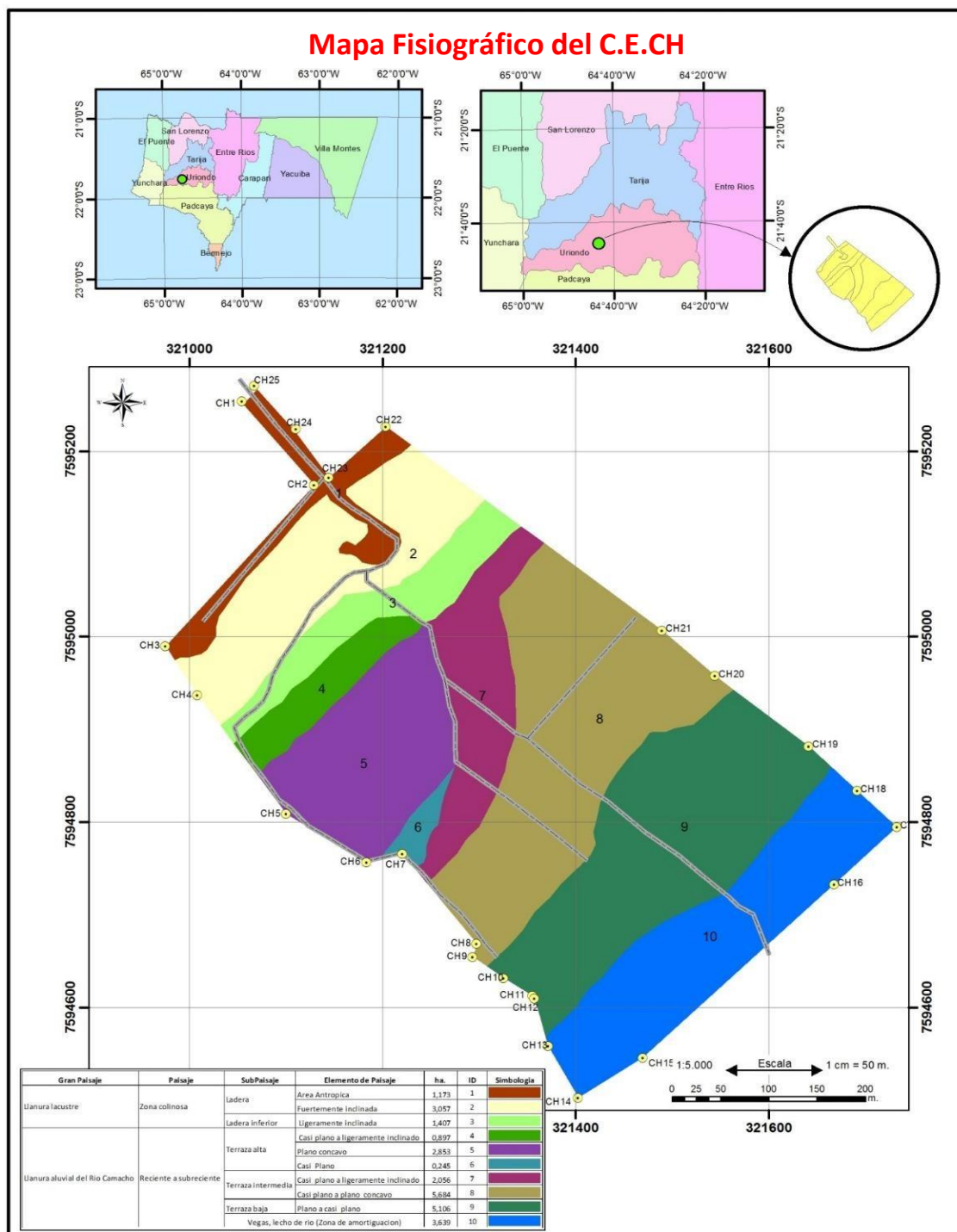
Zona fluvio-lacustre.- Comprende la zona colinosa o inclinada del CECH, que forma parte de la antigua llanura fluvio-lacustre originada por un proceso de sedimentación en un ambiente de lago. (Pedraza, 2018).

Cuadro 6. División del Paisaje Fisiográfico del CECH.

Gran paisaje	Paisaje	Sud-paisaje	Elemento de Paisaje	ID	Nueva codificación
Llanura fluvio-lacustre	Zona colinosa	Ladera	Área antrópica	1	-
			Fuertemente inclinado	2	H
		Ladera inferior	Ligeramente inclinado	3	G
Llanura aluvial del río Camacho	Resiente a subreciente	Terraza alta	Casi plano	4	F
			Plano cóncavo	5	E
			Casi plano	6	D
		Terraza intermedia	Ligeramente inclinado	7	C
			Plano cóncavo	8	B
		Terraza baja	Casi plano	9	A
		Lecho de río	Zona aluvial de amortiguación	10	-

Fuente (Pedraza, 2018)

Figura 5. Mapa Fisiográfico del C.E.CH.



Fuente (Pedraza, 2018)

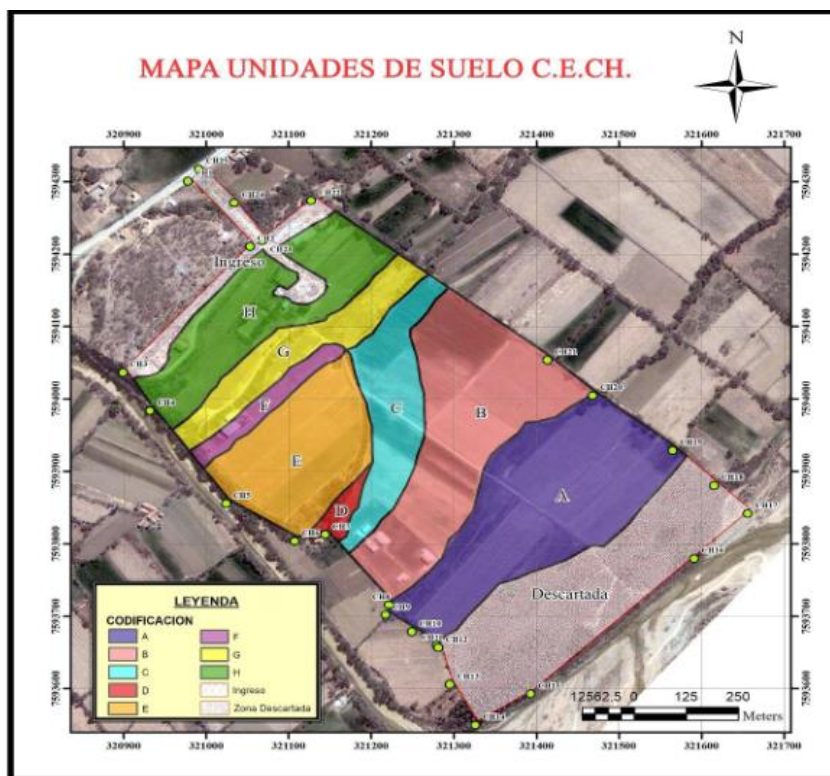
Suelos

Los suelos del CECH son de origen aluvial y fluvio-lacustre, los primeros son generalmente profundos, de texturas media a finas. En cambio los suelos de la zona colinosa de origen fluvio-lacustre tienen profundidad variable, de textura finas a medias, gravosos y muy susceptibles a procesos de erosión hídrica. (Segovia 2016)

Textura

La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa. (Pedraza, 2018).

Figura 6. Mapa de las unidades de suelo del C.E.CH



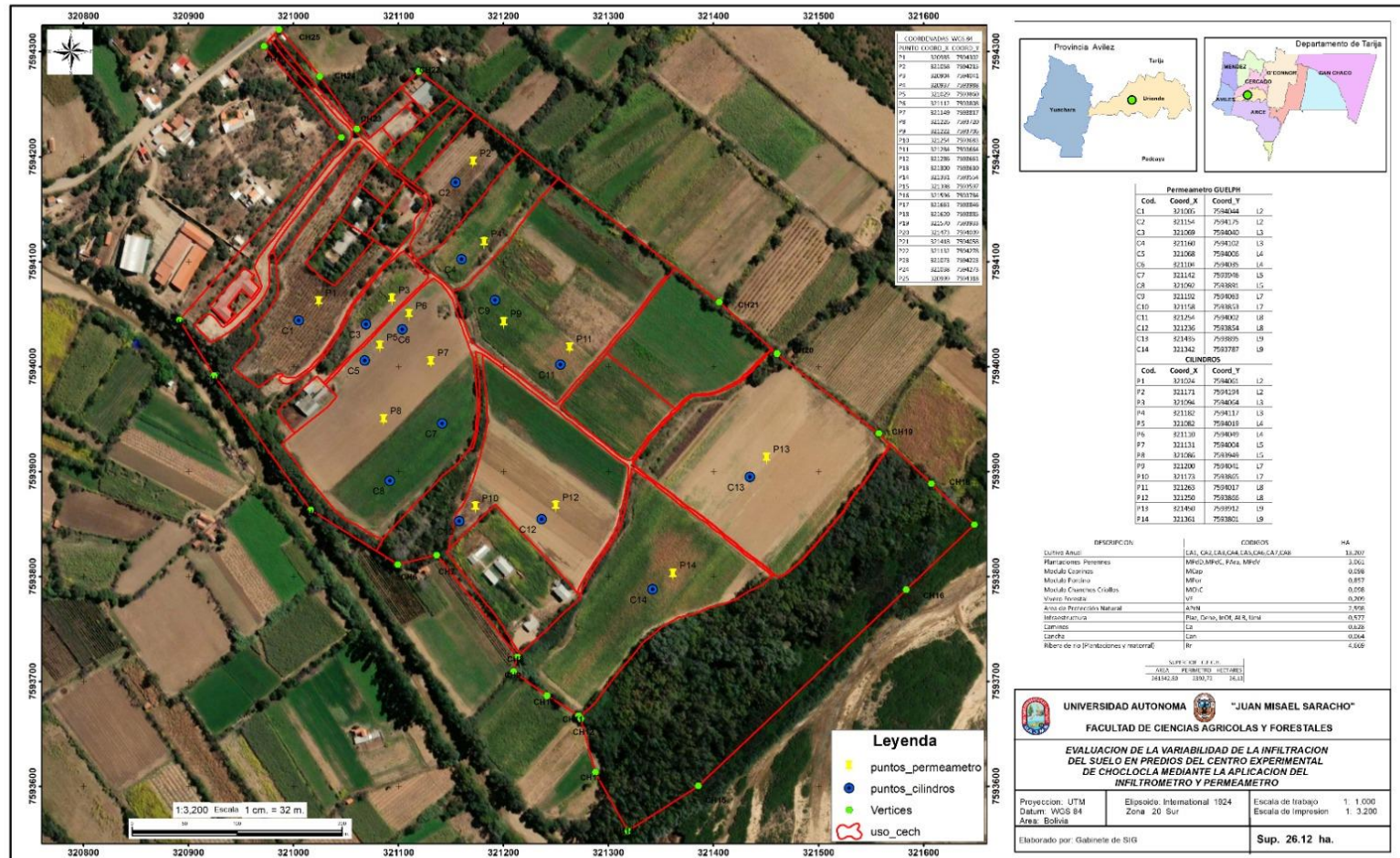
Fuente (Pedraza, 2018).

Cuadro 7. Tabla de clase textural con la profundidad de extracción de 0 – 20 cm por unidad de suelo

UNIDAD DE SUELO	ID	ARENA	ARCILLA	LIMO	CLASE TEXTURAL
		%	%	%	
A	9	32,4	31,6	36	Franco Arcilloso
B	8	29,8	28,2	42	Franco Arcilloso
C	7	29,8	18,2	52	Franco Limoso
D	6	55,8	24,2	20	Franco Arcillo Arenoso
E	5	34,4	21,6	44	Franco
F	4	40,4	27,6	32	Franco
G	3	40,4	25,6	34	Franco
H	2	52,4	17,6	30	Franco Arenoso

Fuente (Pedraza, 2018).

Figura 7. Mapa de ubicación de las pruebas de infiltración



Vegetación Natural

La vegetación natural de la zona corresponde a la zona de vida Bosque seco templado. En la actualidad la vegetación nativa, corresponde una vegetación secundaria compuesta por: matorrales xerofíticos secundarios, las especies características son:

Cuadro 8. Vegetación natural del centro experimental de Chocloca

Nombre común	Nombre científico	FAMILIA
Churqui	<i>Acacia caven</i> (Molina) Molina	Leguminosae
Tusca	<i>Acacia aroma</i> Gillex ex Hook.&	Leguminosae
Algarrobo	<i>Prosopis</i> sp.	Leguminosae
Chañar	<i>Geoffroea decorticans</i> (Gill. ex Hook. & Arn.) Burkart	Leguminosae
Molle	<i>Schinus molle</i> L.	Anacardiaceae
Eucalipto	<i>Eucalyptus</i> sp.	Myrtaceae
Alamo	<i>Populus alba</i> L.	Salicaceae
Sauce llorón	<i>Salix babilónica</i> L.	Salicaceae
Ciprés	<i>Cupressus</i> sp.	Cupresaceae
Sina Sina	<i>Parkinsonia aculeata</i> L.	Leguminosae

(Elaboración propia)

Cuadro 9. Cultivos anuales

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Maíz	<i>Zea mays</i> L.	Poaceae
Orégano	<i>Origanum vulgare</i> L.	Labiatae
Cebolla	<i>Allium cepa</i> L.	Liliaceae

(Elaboración propia)

Cuadro 10. Cultivos perennes

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA
Durazno	<i>Prunus pérsica</i> (L.) Batsch	Rosaceae
Vid	<i>Vitis vinífera</i> L.	Vitaceae
Higuera	<i>Ficus carica</i> L.	Moraceae
Menbrillo	<i>Cydonia oblonga</i> Miller	Rosaceae

(Elaboración propia)

Uso Actual

El uso actual de la tierra en el CECH tiene características de uso intensivo y mixto, es decir, por un lado, se siembra cultivos anuales a riego como maíz (*Zea mays*), orégano (*Origanum vulgare*), cebolla (*Allium cepa* L.) y hortalizas, también se tiene cultivos perennes a riego como vid (*Vitis vinifera*), durazneros (*Prunus pérsica* L.).

Por otro lado, se realizan diferentes investigaciones como tesis de grado con algunos diseños experimentales, algunos diseños con plantas forestales, plantaciones forestales en la rivera del río y actividades de apicultura.

Otra actividad importante, en el CECH, se realiza diferentes tipos de prácticas con los alumnos de las carreras de Ingeniería Agronómica e Ingeniería Forestal. Este conjunto de actividades intensas constituye el uso actual de la tierra en el CECH.

EL manejo de los suelos del CECH se lo realiza mediante la utilización de maquinaria agrícola, siendo poca la utilización del arado tradicional tirado por bueyes, se utiliza maquinaria para la labranza en todos los suelos del CECH a excepción de las áreas con cultivos frutales, las zonas con plantaciones forestales y las zonas con construcciones agropecuarias como las granjas porcina y lechera.

Materiales

Materiales de campo

- Infiltrómetro de doble cilindro
- Permeámetro Guelph
- Balde
- Bidones
- Cinta métrica
- Pala
- Azadón
- Nivel de mano
- Regla (30 cm)
- 1 combo
- Carretilla

Materiales de gabinete

- Planillas
- Tablero
- Bolígrafos
- Libreta de campo
- Computadora
- Celular

Metodología

Tipo de investigación

La investigación que se realizara es de tipo descriptivo, pues en cada uno de los puntos de muestreo se hace un análisis minucioso de la infiltración de suelo usando dos métodos, y de ello se ve los resultados en cada uno de ellos.

Descripción del procedimiento

Método del infiltrómetro de doble anillo

Los anillos de infiltración sirven para hacer pruebas que determinan la permeabilidad en suelo, simulando el proceso de infiltración del agua en el suelo. Las pruebas se realizan enterrando dos anillos de forma concéntrica, esto quiere decir que una es de diámetro mayor que la otra. Se llenan ambas con agua y se mide la tasa de descenso de esta agua en el anillo interior. Se realiza así para que el flujo del agua en el suelo sea lo más vertical posible, dado que la infiltración en la anilla externa limita el flujo lateral del agua infiltrada por el anillo interno, disminuyendo la distorsión de los datos obtenidos. (Delgadillo, 2016).

Para realizar la prueba de infiltración de debe realizar las siguientes actividades:

1) Lugar representativo

Una vez que hayamos definido la parcela donde se realizará la prueba de infiltración se debe tener cuidado de ubicar un sitio representativo del lugar.

2) Limpieza del lugar

Se debe realizar una limpieza adecuada del sitio de la prueba sin dañar las condiciones iniciales del suelo, es decir, solamente retirar material vegetal grueso o basuras, cuidando de no dañar excesivamente la superficie del suelo.

3) Provisión de agua

Se deberá llevar la cantidad de agua suficiente así para garantizar la finalización de la prueba con éxito.

4) Instalación de los anillos

Las anillas se colocan en forma concéntrica, asegurándose que se introduzcan por lo menos 10 cm de profundidad. Esto determinará el éxito de la prueba, pues sino se realiza un adecuado instalado el agua podría filtrar, lo cual significaría repetir e iniciar nuevamente la instalación.

5) Vertido de agua

Una vez instaladas los dos anillos en forma concéntrica, alistado el cronómetro o reloj y ubicada la regla graduada, se procede a verter el agua en ambos compartimentos creados por la disposición de los anillos.

6) Lecturas

La lectura es muy simple, pues solamente se anota la altura de agua mientras desciende, mediante la regla pegada a la pared del anillo interno, a ciertos intervalos de tiempo. (Delgadillo, 2016).

Método del permeámetro de Guelph

El Guelph Permeameter es un permeámetro de cabeza constante en el agujero, que emplea el Principio de Marriotte. El método consiste en medir la tasa de retención de agua en estado estable en el suelo insaturado de un pozo cilíndrico, en el que se mantiene una profundidad (cabezal) constante de agua.

Se establece y mantiene un nivel de carga constante en el orificio del pozo al nivel del fondo del tubo de aire mediante la regulación de la posición de la parte inferior del tubo de aire, que se encuentra en el centro del permeámetro. A medida que cae el nivel del agua en el depósito, se crea un vacío en el espacio de aire sobre el agua.

El vacío solo se puede aliviar cuando el aire de la presión de la atmósfera ambiente, que entra por la parte superior del tubo de aire, sale por la boquilla de entrada de aire y sube a la parte superior del depósito. Cada vez que el nivel del agua en el pozo comienza a caer por debajo de la entrada de aire, las burbujas de aire emergen de la punta y ascienden al espacio aéreo del depósito. El vacío se alivia parcialmente y el agua del depósito repone el agua en el pozo. (Reynolds & otros, 1986).

En esencia, el permeámetro de Guelph consta de dos tubos, uno que actúa como depósito de agua y otro de menores dimensiones que se pone en contacto con el suelo y lleva acoplado un sistema que permite mantener una carga hidráulica constante. (Gonzales & otros 2001).

1. Para utilizar el permeámetro se perfora un orificio en el suelo con una sonda hasta de 15 cm de profundidad.

2. El depósito cilíndrico se llena con agua sin impurezas para evitar obstrucciones y se cierra para crear condiciones de vacío.
3. Se introduce el cilindro menor en el orificio, cuidando que el permeámetro quede nivelado para facilitar las lecturas.
4. Se abre el émbolo que está situado en la parte superior del permeámetro y se realiza la lectura para dos cargas hidráulicas constantes (5 y 10 cm). (Gonzales & otros 2001).

Procedimiento experimental

Selección de Sitios de Estudio:

- Se dividió los predios del Centro Experimental de Chocloca en varias parcelas representativas.

Pruebas de Permeabilidad:

- Utilización de permeámetros para medir la capacidad de paso de agua a través del suelo.

Pruebas de Infiltración:

- Se empleó el infiltrómetro de doble anillo para medir la tasa de infiltración en cada punto de muestreo.
- Realizar repeticiones en cada punto para obtener datos precisos.

Análisis de Datos:

- Comparación y correlación de los resultados obtenidos de ambas pruebas.
- Aplicación de métodos estadísticos para determinar la relación entre la permeabilidad y la infiltración.

Desarrollo del Modelo:

- Creación de un modelo predictivo utilizando técnicas de regresión y análisis multivariante.
- Validación del modelo con datos adicionales.

Variables a medir

Infiltración.

Permeabilidad.

Variabilidad espacial de la infiltración y la permeabilidad.

Cuadro 11. Tabla de interpretación de resultados de la infiltración básica

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS		
CLASE	VELOCIDAD INFILTRACIÓN mm/hora	EVALUACIÓN
1	<1	Suelo adecuado para cultivo de arroz, por la susceptibilidad al encharcamiento superficial. Riesgo de erosión elevado.
2	1-5	Lenta. Riesgo de erosión importante. Se pierde una parte considerable de agua de riego. Puede haber falta de aireación para la raíces en condiciones de exceso de humedad.
3	5-20	Moderadamente lenta. Óptima para riego de superficie.
4	20-60	Moderada. Adecuada para riego de superficie.
5	60-125	Moderadamente rápida. Demasiado rápida para riego de superficie, provoca pérdidas de nutrientes por lavado. Baja eficiencia de riego.
6	125-250	Rápida. Marginal para riego de superficie.
7	>250	Muy rápida. Excesiva para riego de superficie. Característica de los suelos muy arenosos. Se requiere riego localizado.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Infiltración básica a través de las metodologías propuestas anillos Infiltrómetro de doble cilindro y Permeámetro de Guelph.

Infiltración básica con el cilindro

Se procedió a realizar las pruebas de infiltración utilizando los anillos Infiltrómetro de doble cilindro, de cada lote del CECH se tomaron dos pruebas en lugares distintos representativos esto con el fin de encontrar una media de la infiltración básica de cada lote. Una vez procesados los datos se llegó a obtener una nube de puntos con su respectiva curva de infiltración que se puede apreciar en las gráficas (3 - 16) y con su ecuación de la infiltración instantánea.

Cuadro 12. Ecuación de la infiltración instantánea y su coeficiente de correlación obtenidos mediante los anillos infiltrómetro de doble cilindro

Lotes	Pruebas	Infiltración Instantánea	Coeficiente Determinación
2	2,1	$y = 2,2289x^{-0,354}$	$R^2 = 0,7383$
	2,2	$y = 1,0964x^{-0,764}$	$R^2 = 0,973$
3	3,1	$y = 0,8537x^{-0,308}$	$R^2 = 0,6504$
	3,2	$y = 0,4114x^{-0,404}$	$R^2 = 0,8647$
4	4,1	$y = 0,5414x^{-0,41}$	$R^2 = 0,8975$
	4,2	$y = 0,2061x^{-0,357}$	$R^2 = 0,7123$
5	5,1	$y = 0,1952x^{-0,666}$	$R^2 = 0,8162$
	5,2	$y = 0,2563x^{-0,329}$	$R^2 = 0,6111$
7	7,1	$y = 0,3001x^{-0,577}$	$R^2 = 0,8697$
	7,2	$y = 0,3439x^{-0,347}$	$R^2 = 0,6098$
8	8,1	$y = 0,3212x^{-0,504}$	$R^2 = 0,6684$

	8,2	$y = 0,1676x^{-0,572}$	$R^2 = 0,8113$
9	9,1	$y = 0,2583x^{-0,417}$	$R^2 = 0,7283$
	9,2	$y = 0,1958x^{-0,608}$	$R^2 = 0,8523$

Analizando el cuadro se observa las ecuaciones de la infiltración instantánea de cada punto de muestreo con su correspondiente coeficiente de determinación (r^2) ajustado a una ecuación potencial. Este coeficiente de determinación (r^2) nos indica, que un valor cercano a 1 es un buen ajuste al modelo potencial. Se puede apreciar que los datos procesados nos dan un ajuste de 0,6098 como mínimo y 0,973 como máximo esto significa que el modelo potencial es el más preciso para estimar la infiltración básica. Según Benítez, Castillo y Montaña (2017), el coeficiente de determinación (r^2), de su investigación dieron valores muy próximos a 1 (0,8556 a 0,9269), con excepción de la zona 4, que presento un valor más bajo en $r^2 = 0,6413$, pero que también fue un valor aceptable, equivalente al coeficiente de determinación $r = 0,8$.

Cuadro 13. Infiltración básica (Ib) de cada punto de muestreo del CECH con su respectivo tiempo base (Tb).

Lotes	Pruebas	Ib mm/h	Tb = - 100b (min)
2	2,1	378	35,4
	2,2	24	76,4
3	3,1	180	30,8
	3,2	54	40,4
4	4,1	72	41
	4,2	36	35,7
5	5,1	6	66,6
	5,2	48	32,9
7	7,1	18	57,7
	7,2	60	34,7
8	8,1	30	50,4

	8,2	12	57,2
9	9,1	36	41,7
	9,2	12	60,8

Cuadro 14. Datos de la infiltración básica promedio de cada lote obtenidos con los anillos infiltrómetro de doble cilindro

Lotes	Prom. Infiltración básica (mm/h) $Tb = -100b$ Cilindros
2	201mm/h
3	117 mm/h
4	54 mm/h
5	27mm/h
7	39 mm/h
8	21 mm/h
9	24mm/h

De acuerdo a los resultados obtenidos se procedo a la obtención de la infiltración básica promedio de cada lote del CECH. Conociendo la ecuación de la infiltración instantánea que se puede apreciar en el cuadro 12 y conociendo el $Tb = -100b$ que se puede ver en el cuadro 13 se procedió al cálculo de la infiltración básica de todos los lotes, ejemplo realizado en el anexo 29, posterior a eso se sacó un resultado promedio de cada lote. Los resultados obtenidos de la infiltración básica (Ib) promedio, fueron de 21mm/h como mínimo y de 201mm/h como máximo del área de estudio. Según Solórzano (2023), los resultados obtenidos de la infiltración básica (Ib), del área de estudio de su investigación con el método de campo de los anillos infiltrómetro le permitió obtener valores como mínimo de 22,4 mm/hora y como máximo de 64,0

mm/hora, lo que le permitió deducir la mínima dispersión encontrada respecto a esta técnica.

Determinación de la permeabilidad con el Permeámetro de Guelph

El Kit del Permeámetro Guelph es un instrumento de fácil manejo que nos permitió medir in-situ la permeabilidad de manera rápida y precisa de los suelos del CECH.

A partir del procedimiento planteado se procedió a la obtención de la permeabilidad de los suelos del Centro Experimental de Chocloca, con este aparato se tomaron los siguientes datos:

Cuadro 15. Valores matemáticas para encontrar la infiltración básica con el Permeámetro de Guelph

Lotes	Pruebas	H1 5cm R1cm/min	H2 10cm R2 cm/min	Kfs cm/min De la hoja de calculo	Kfs mm/h
2	2,1	0,6	1	$3,52 \times 10^{-02}$	21,12
	2,2	0,1	0,3	$2,45 \times 10^{-02}$	14,7
3	3,1	0,35	0,6	$2,29 \times 10^{-02}$	13,74
	3,2	0,15	0,4	$2,98 \times 10^{-02}$	17,88
4	4,1	0,25	0,5	$2,63 \times 10^{-02}$	15,78
	4,2	0,3	0,6	$3,16 \times 10^{-02}$	18,96
5	5,1	0,05	0,1	$5,26 \times 10^{-03}$	3,156
	5,2	0,15	0,3	$1,58 \times 10^{-02}$	9,48
7	7,1	0,6	2,5	$1,50 \times 10^{-02}$	9
	7,2	0,1	0,2	$1,05 \times 10^{-02}$	6,3
8	8,1	0,15	0,4	$2,98 \times 10^{-02}$	17,88
	8,2	0,5	1,3	$5,80 \times 10^{-03}$	3,48
9	9,1	0,6	2	$1,07 \times 10^{-02}$	6,42
	9,2	0,75	2,2	$1,08 \times 10^{-02}$	6,48

En cada lote se procedió a realizar dos pruebas de permeabilidad a dos alturas de carga de 5cm y 10cm (ver anexo 15 – 28), posteriormente se obtuvo los datos de la tasa de infiltración (R1 y R2) correspondientes a cada altura de carga, estos datos se exportaron a una hoja electrónica de Excel (ver anexo 30), donde se obtuvo los resultados de la conductividad hidráulica saturada (Kfs cm/min), estos datos fueron necesarios para encontrar la infiltración básica utilizando el Permeámetro Guelph.

Cuadro 16. Datos de infiltración básica promedio obtenidos con el permeámetro Guelph

Lotes	Prom. Infiltración Básica (mm/h) Permeámetro
2	17,91
3	15,81
4	17,37
5	6,32
7	7,65
8	10,68
9	6,45

Una vez obtenido los resultados de la conductividad hidráulica saturada (Kfs cm/min) de cada punto de muestreo se lo multiplicamos por 600 para obtener los resultados de la infiltración básica en mm/hora (ver cuadro 15), luego se obtuvo una media de cada lote. Los resultados obtenidos fueron de 6,45mm/h como mínimo y de 17,91 mm/h como máximo del área de estudio. Según Solórzano (2023), la infiltración básica obtenida en su trabajo de investigación con el método de campo del permeámetro de Guelph le permitió obtener un valor mínimo de 4,6 mm/hora y un valor máximo de 31,9 mm/hora, demostrando una mínima dispersión encontrada respecto al parámetro utilizando en esa técnica.

Comparación de datos de la infiltración básica con el Permeámetro de Guelph y los cilindros de doble anillo.

Según los resultados obtenidos con ambos métodos se pudieron comprobar una importante dispersión, con los valores de la infiltración, para el caso de los anillos infiltrómetro y el Permeámetro de Guelph (ver cuadro 17).

Cuadro 17. Comparación de los resultados de infiltración básica (Ib) con los anillos infiltrómetro de doble cilindro y el Permeámetro de Guelph.

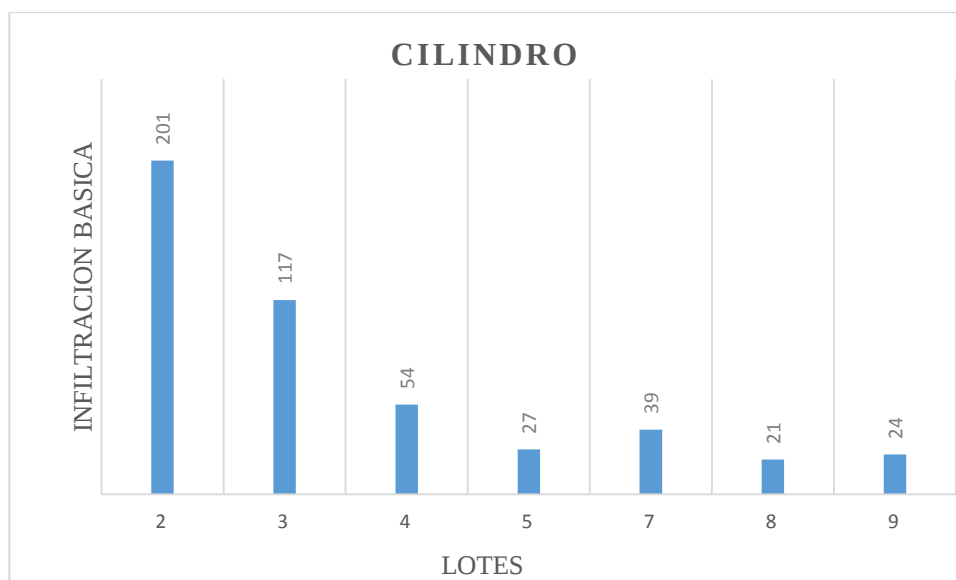
Lotes	Infiltración Básica (mm/h) Tb=-100b Cilindro	Clase	Infiltración Básica (mm/h) Permeámetro	Clase
2	201	6	17,91	3
3	117	5	15,81	3
4	54	4	17,37	3
5	27	4	6,318	3
7	39	4	7,65	3
8	21	4	10,68	3
9	24	4	6,45	3
Promedio	69		11,74	

Analizando el cuadro podemos observar que según la tabla de interpretación de resultados de la infiltración básica mm/h (ver cuadro 11), nos indica que los lotes 4, 5, 7, 8 y 9 están en la categoría infiltración moderada clase 4, en un rango de 20mm/h – 60mm/h, mientras que el lote 3 entra en la categoría moderadamente rápida clase 5 60mm/h – 125mm/h y el lote 2 en la categoría infiltración rápida clase 6 125mm/h – 250mm/h, pruebas realizadas con el cilindro. Mientras que con el uso del permeámetro de Guelph todos los lotes del Centro Experimental de Chocloca se encuentran en la clase 3 infiltración moderadamente lenta. Esto debido a la carga constante que tiene este aparato. Según Alvarado y Barahona (2017), concluyeron que el método de doble anillo obtuvo valores significativamente mayores que el método de carga constante

(Permeámetro de Guelph). Finalizando que el valor de recarga potencial que se obtiene por los métodos de carga variable está influenciado mayormente por los macroporos, por lo que se comprenden que resultara en valores mayores, mientras que el método de permeámetro de Guelph, por lo microporos.

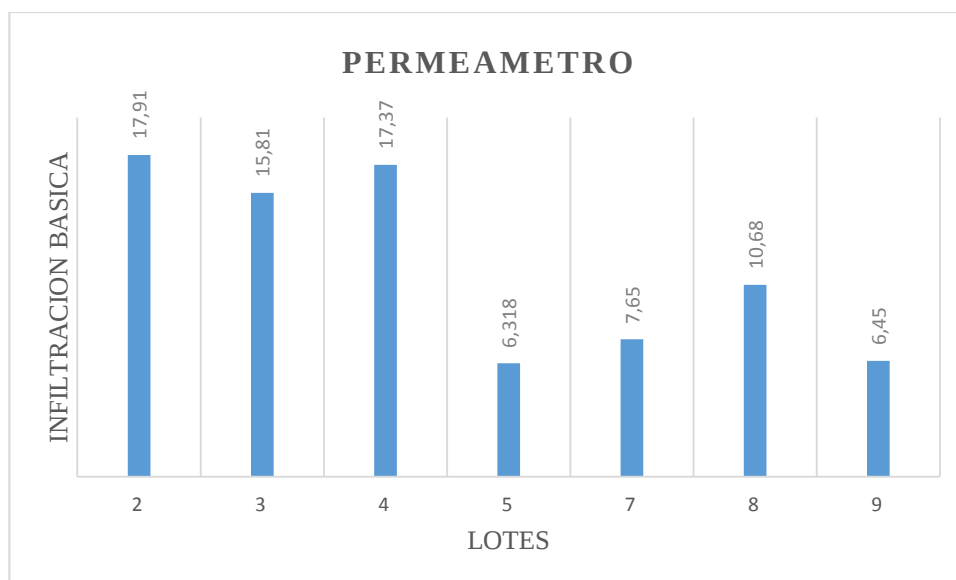
De acuerdo a los resultados obtenidos de la infiltración básica con los cilindros y el permeámetro de cada lote se procedió a obtener un dato promedio de todo el CECH con ambos métodos dando como resultados 69 mm/h con el cilindro y 11,74 mm/h con el permeámetro (ver cuadro 17). Según Solórzano (2023), en su investigación los resultados de la infiltración mediante el uso del doble anillo infiltrómetro tuvieron como promedio 38,4 mm/h, Según los resultados adquiridos en el cálculo de la infiltración básica en el lugar de estudio con el permeámetro de Guelph obtuvieron un promedio de 15,6 mm/h la misma que es una alternativa para medir la infiltración básica de resultados similares o mejores al de los anillo infiltrómetro indican que no hay diferencias significativa entre los dos métodos al calcular la infiltración básica según análisis de coeficientes de variación.

Grafica 1. Resumen de la infiltración promedio del CECH con los anillos infiltrómetro de doble cilindro



En esta grafica observamos que el lote N 2 con una $I_b = 201$ mm/h tiene una mayor tasa de infiltración, a comparación de los otros lotes, según la tabla de interpretación de resultados de la infiltración básica mm/h (ver cuadro 11), nos dice que los lotes 4, 5, 7, 8 y 9 están en la categoría infiltración moderada, que son suelos inadecuados para riego por superficie, esto debido a la clase textural (ver cuadro 7) que tienen los suelos y el grado de compactación de los mismo, mientras que el lote 3 entra en la categoría moderadamente rápida, esto debido a la clase textural y la geomorfología del lote (ver cuadro 6), y el lote 2 en la categoría infiltración rápida que suelos inadecuados para riego por superficie, requieren riego localizado esto debido a la clase textural del lote y a su paisaje fuertemente inclinado.

Grafico 2 Resumen de la infiltración promedio del CECH con el permeámetro de Guelph



Con el uso del permeámetro podemos observar que los resultados de la tasa de infiltración son un poco bajos y esto debido al método de medición y a la carga constante de agua que aplica al suelo dicho aparato. Los resultados nos indican que los suelos del Centro Experimental de Chocloca usando la tabla de interpretación de resultados mostrada en el cuadro 11, están en una categoría de infiltración moderadamente lenta que los suelos son óptimos para riego por superficie.

Propuesta de Medidas de manejo para los suelos del Centro Experimental de Chocloca

Los datos generados con esta investigación nos indican que los lotes del CECH presentan diferentes valores de infiltración. Por lo cual los lotes 4, 5, 7, 8, y 9 presentan una infiltración moderada, que su adecuado riego de estos lotes sea por superficie. El sistema de riego por superficie suelen tener menor eficiencia en el uso del agua que los de otros métodos, dado que el suelo distribuye e infiltra el agua, la cantidad de agua infiltrada depende mucho de las características del mismo suelo que pueden variar considerablemente incluso dentro de la misma parcela. Este sistema de riego puede producir alteraciones en la estructura del suelo y perjudicar el desarrollo de las raíces.

Por lo cual en estos lotes se deben realizar trabajos de subsolado e implementación de materia orgánica para mejorar los procesos de infiltración.

Los datos de la infiltración básica de los lotes 4, 5, 7, 8 y 9 ayudaran a estimar los tiempos de riego necesarios para estas parcelas, ya que la cantidad de agua que requiera el cultivo depende de la velocidad con que el suelo infiltra el agua, esto para evitar excesos de aplicación de agua al suelo o provocar algún déficit de agua a la planta.

Los lotes que se encuentran en la Zona colinosa, ladera superior y ladera inferior lote 2 presentan una infiltración rápida y el lote 3 moderadamente rápida que son suelos no aptos para riego por superficie, precisa riego localizado. Este método de riego facilita un ahorro importante de agua con respecto a otros, facilita la posibilidad de controlar fácilmente la lámina de agua aplicada y aumenta la uniformidad de aplicación, al reducir la filtración profunda o percolación.

Esta información de la infiltración básica de los lotes 2 y 3 ayudaran a seleccionar los emisores de goteo adecuados y establecer el tiempo de riego óptimo, permitiendo calcular la distancia ideal entre los emisores para asegurar una distribución uniforme del agua en la zona radicular y evitara zonas secas o excesivamente húmedas que pueden afectar el crecimiento de las plantas.

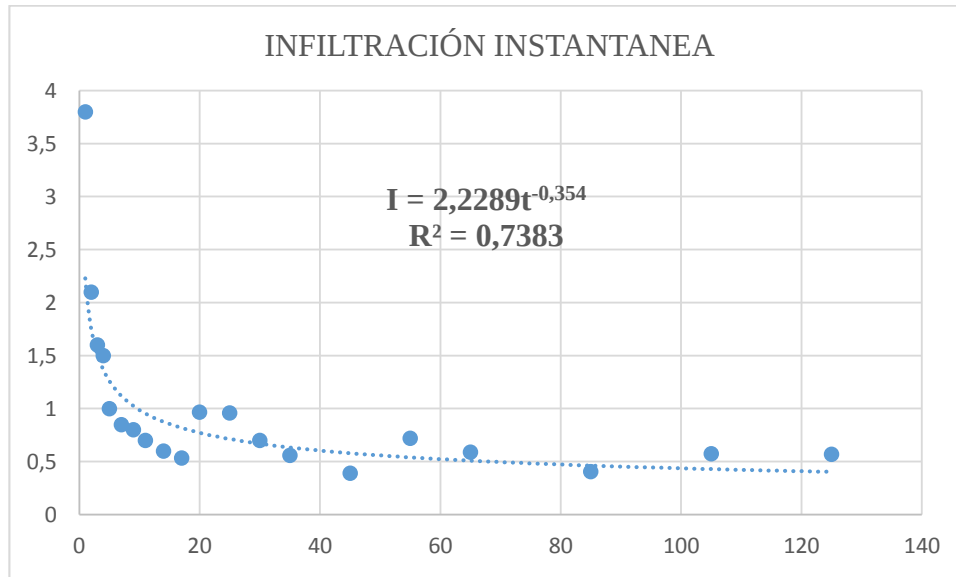
Por lo cual en estos lotes se deben realizar trabajos de incorporar abonos verdes, sembrar cultivos de cobertura como leguminosas y luego incorporarlos al suelo, añadir materia orgánica y mejora la estructura del suelo y su retención de humedad.

Desarrollo de los modelos matemáticos

Ecuación matemática de la infiltración instantánea de los anillo infiltrómetro de doble cilindro para todos los lotes del CECH.

Grafica 3. Infiltración instantánea del lote N 2

Punto1 Ladera superior

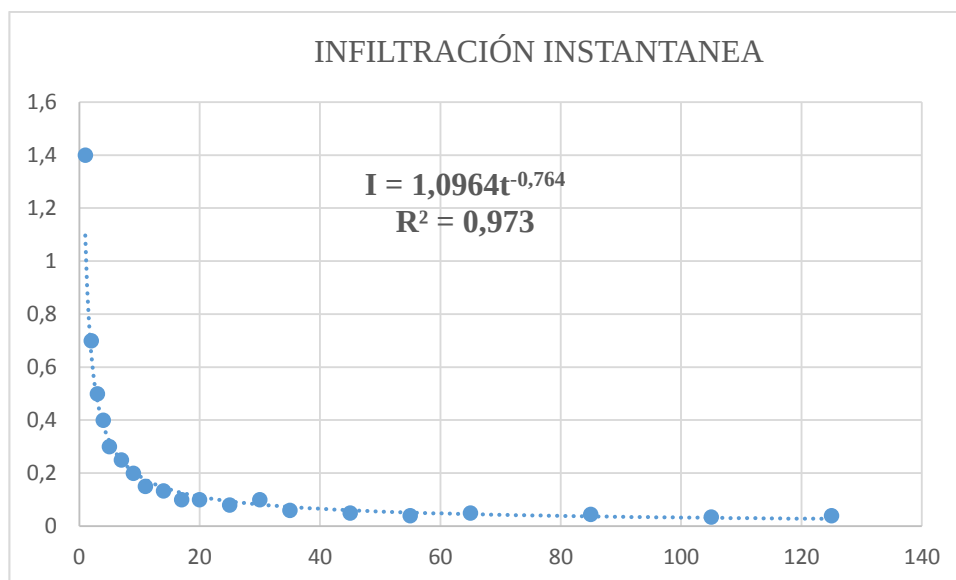


La infiltración básica de la zona colinosa, ladera superior (ver cuadro 6) donde se encuentran la plantación de duraznos tiene una $I_b = 378 \text{ mm/h}$ (ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (ver anexo 1). Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $y = 2,2289t^{-0,354}$ (ver cuadro 12) donde:

$$a = 2,2289 \quad b = -0,354 \quad t \rightarrow Tb = 35,4 \text{ min (Ver cuadro 13).}$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 2 prueba 1 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (Tb) en esta ocasión un $Tb = -100b$ (ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 35,4 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 4. Punto 2 Ladera superior



La infiltración básica de la zona colinosa, ladera superior (ver cuadro 6), donde se encuentran la plantación de vid tiene una $Ib = 24mm/h$ (ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (ver anexo 2).

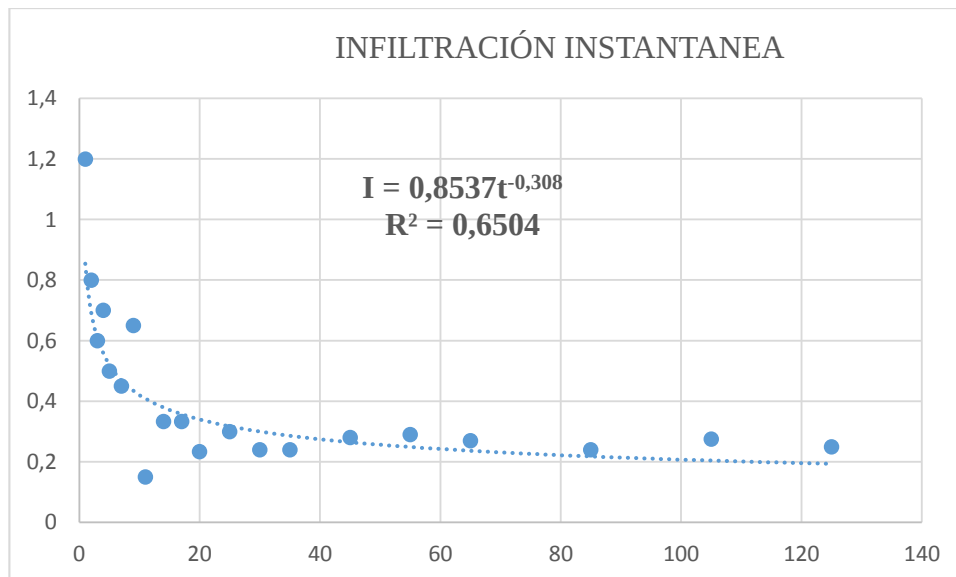
Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $1,0964t^{-0,764}$ (ver cuadro 12), donde:

$$a = 1,0964 \quad b = -0,764 \quad t \rightarrow Tb = 76,4 \text{ min (Ver cuadro 13)}.$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 2 prueba 2 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (Tb) en esta ocasión un $Tb = -100b$ (ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 76,4 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 5. Infiltración instantánea del lote N 3

Punto 1 ladera inferior

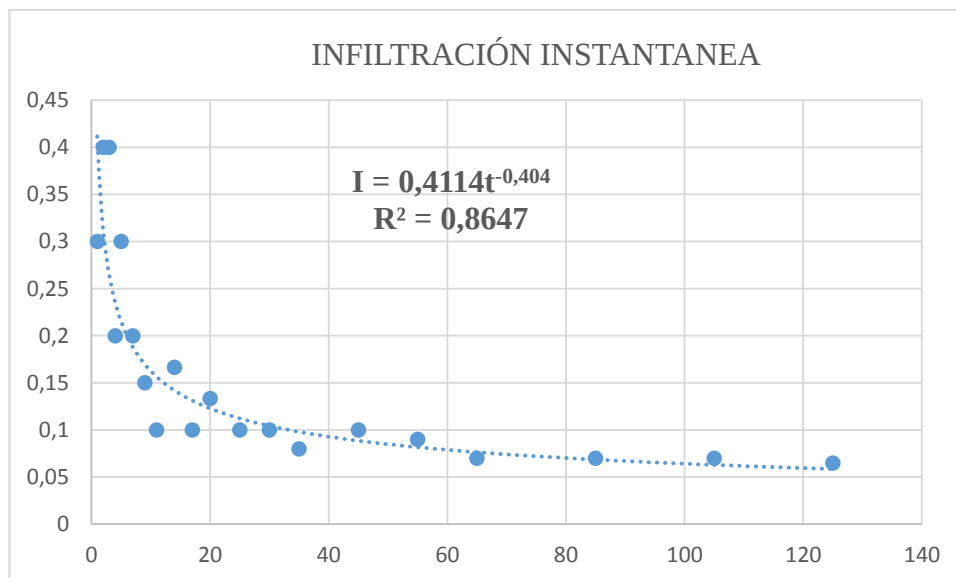


La infiltración básica de la zona colinosa, ladera inferior (ver cuadro 6), tiene una $I_b = 180\text{mm/h}$ (ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (Ver anexo 3).

Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,8537t^{-0,308}$ (ver cuadro 12), donde:

$$a = 0,8537 \quad b = -0,308 \quad t \rightarrow Tb = 30,8 \text{ min (Ver cuadro 13)}.$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 3 prueba 1 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (Tb) en esta ocasión un $Tb = -100b$ (ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 30,8 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 6. Punto 2 Ladera inferior

La infiltración básica de la zona colinosa, ladera inferior (ver cuadro 6), donde se encuentran la plantación de manzanos tiene una $Ib = 54 \text{ mm/h}$ (ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (Ver anexo 4).

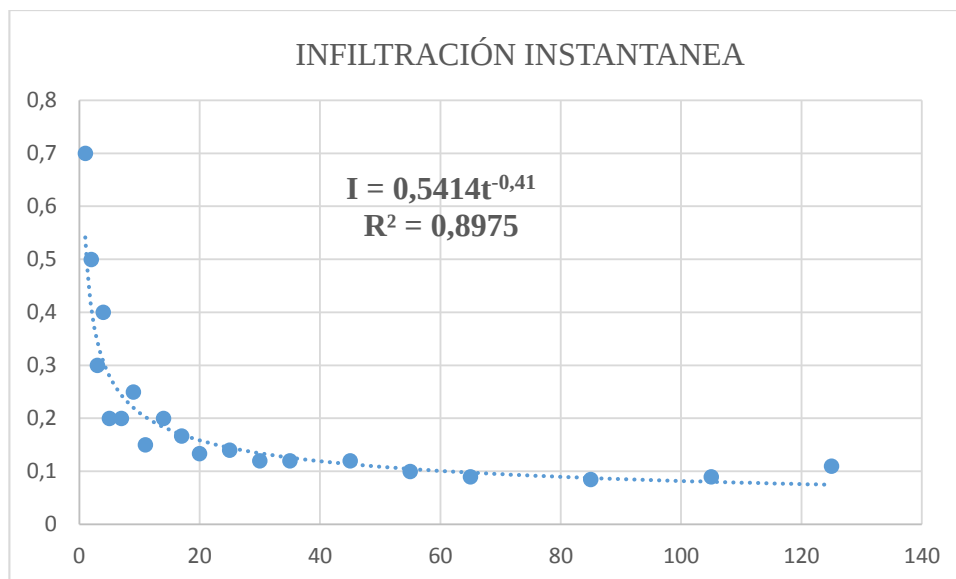
Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,4114t^{-0,404}$ (ver cuadro 12) donde:

$$a = 0,4114 \quad b = -0,404 \quad t \rightarrow Tb = 40,4 \text{ min} \text{ (Ver cuadro 13).}$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 3 prueba 2 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (Tb) en esta ocasión un $Tb = -100b$ (ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 40,4 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 7. Infiltración instantánea del lote N 4

Punto 1 Terraza alta lote (F)



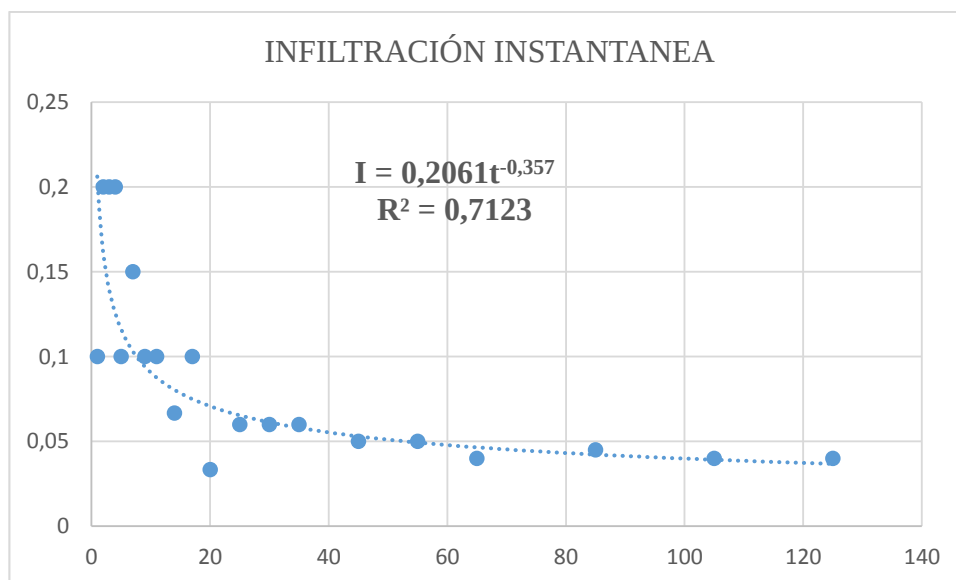
La infiltración básica en la llanura aluvial del río Camacho en la terraza alta en el lote F (ver cuadro 6), tiene una $I_b = 72 \text{ mm/h}$ (ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (ver anexo 5).

Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,5414t^{-0,41}$ (Ver cuadro 12), donde:

$$a = 0,5414 \quad b = -0,41 \quad t \rightarrow Tb = 41 \text{ min (Ver cuadro 13).}$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 4 prueba 1 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (T_b) en esta ocasión un $T_b = -100b$ (ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 41 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 8. Punto 2 terraza alta lote (F)



La infiltración básica en la llanura aluvial del río Camacho en la terraza alta en el lote F (ver cuadro 6), tiene una $I_b = 36 \text{ mm/h}$ (ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (Ver anexo 6).

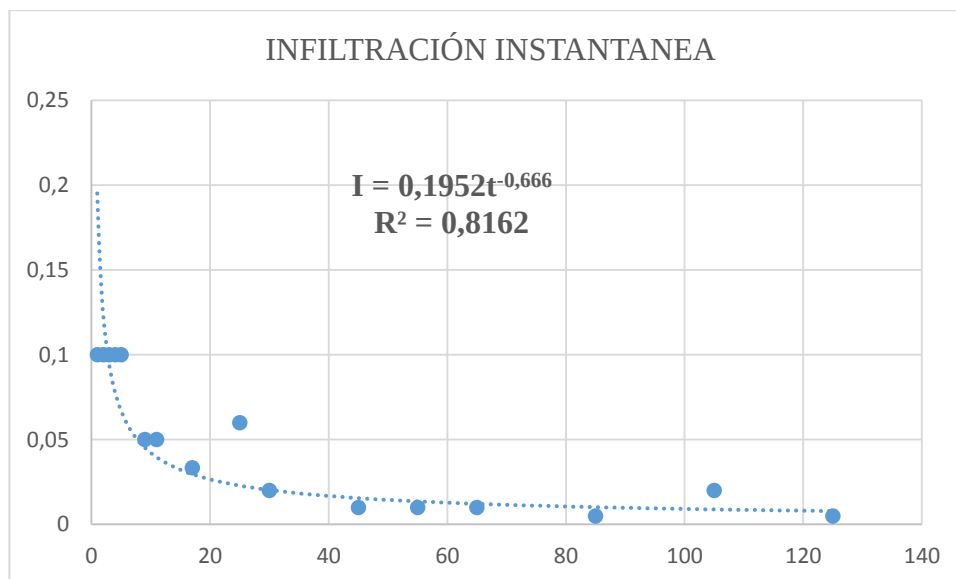
Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,2061t^{-0,357}$ (ver cuadro 12) donde:

$$a = 0,2061 \quad b = -0,357 \quad t \rightarrow Tb = 35,7 \text{ min (Ver cuadro 13).}$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 4 prueba 2 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (Tb) en esta ocasión un $Tb = -100b$ (ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 35,7 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 9. Infiltración instantánea del lote N 5

Punto 1 terraza alta lote (E)



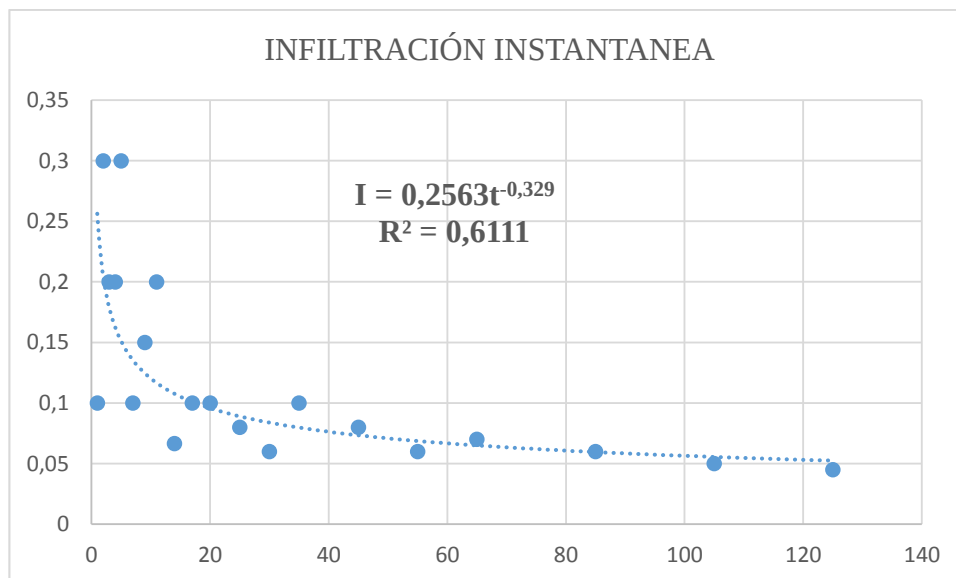
La infiltración básica en la llanura aluvial del río Camacho en la terraza alta en el lote E (ver cuadro 6), tiene una $I_b = 6 \text{ mm/h}$ (ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (Ver anexo 7).

Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,1952t^{-0,666}$ (Ver cuadro 12) donde:

$$a = 0,1952 \quad b = -0,666 \quad t \rightarrow Tb = 66,6 \text{ min} \text{ (Ver cuadro 13)}$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 5 prueba 1 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (Tb) en esta ocasión un $Tb = -100b$ (ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 66,6 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 10. Punto 2 terraza alta lote (E)



La infiltración básica en la llanura aluvial del río Camacho en la terraza alta en el lote E (ver cuadro 6), tiene una $I_b = 48 \text{ mm/h}$ (ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (Ver anexo 8).

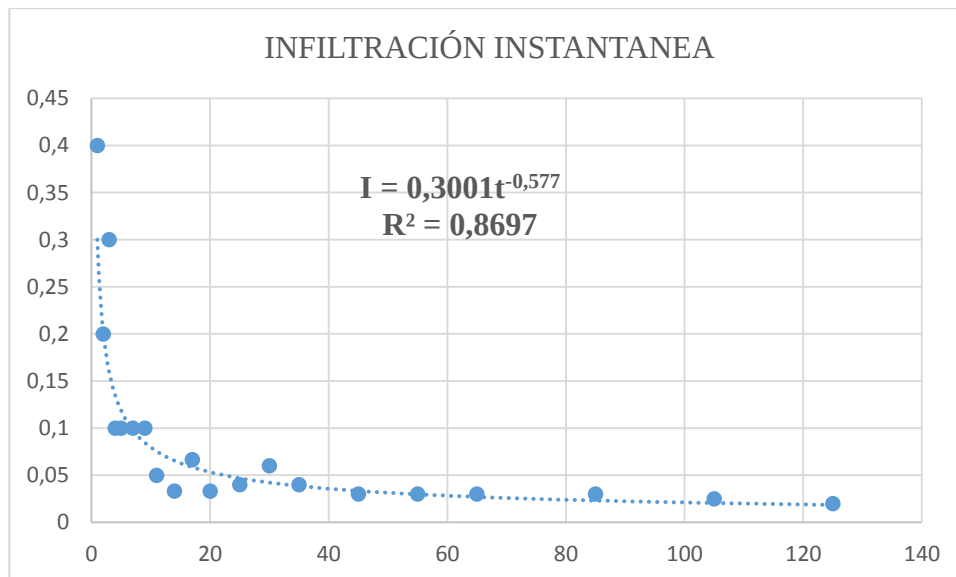
Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,2563t^{-0,329}$ (Ver cuadro 12), donde:

$$a = 0,2563 \quad b = -0,329 \quad t \rightarrow Tb = 32,9 \text{ min} \text{ (Ver cuadro 13)}$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 5 prueba 2 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (Tb) en esta ocasión un $Tb = -100b$ (ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 32,9 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 11. Infiltración instantánea del lote N 7

Punto 1 terraza intermedia lote (c)



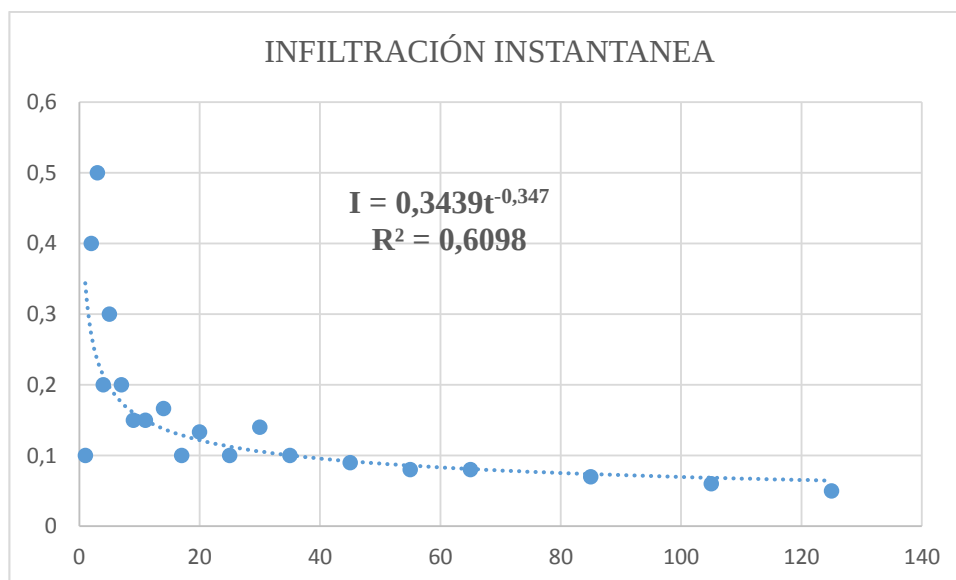
La infiltración básica en la llanura aluvial del río Camacho en la terraza intermedia en el lote C (ver cuadro 6), tiene una $I_b = 18 \text{ mm/h}$ (ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (Ver anexo 9).

Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,3001t^{-0,577}$ (Ver cuadro 12), donde:

$$a = 0,3001 \quad b = -0,577 \quad t \rightarrow Tb = 57,7 \text{ min (Ver cuadro 13).}$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 7 prueba 1 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (T_b) en esta ocasión un $T_b = -100b$ (ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 57,7 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 12. Punto 2 terraza intermedia lote (C)



La infiltración básica en la llanura aluvial del río Camacho en la terraza intermedia en el lote C (ver cuadro 6), tiene una $I_b = 60 \text{ mm/h}$ (ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (Ver anexo 10).

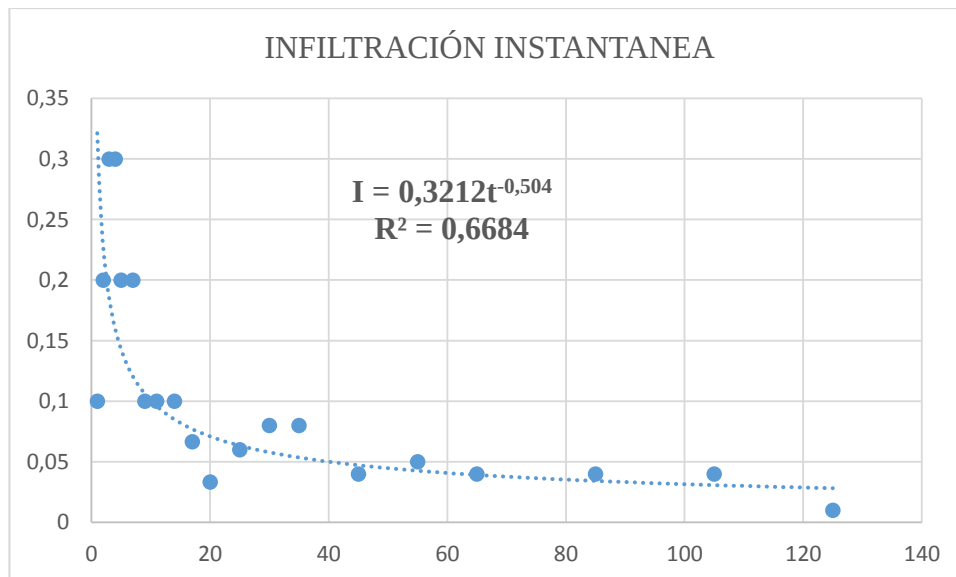
Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,3439t^{-0,347}$ (Ver cuadro 12), donde:

$$a = 0,3439 \quad b = -0,347 \quad t \rightarrow Tb = 34,7 \text{ min} \text{ (Ver cuadro 13).}$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 7 prueba 2 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (Tb) en esta ocasión un $Tb = -100b$ (ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 34,7 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 13. Infiltración instantánea del lote N 8

Punto 1 terraza intermedia lote (B)



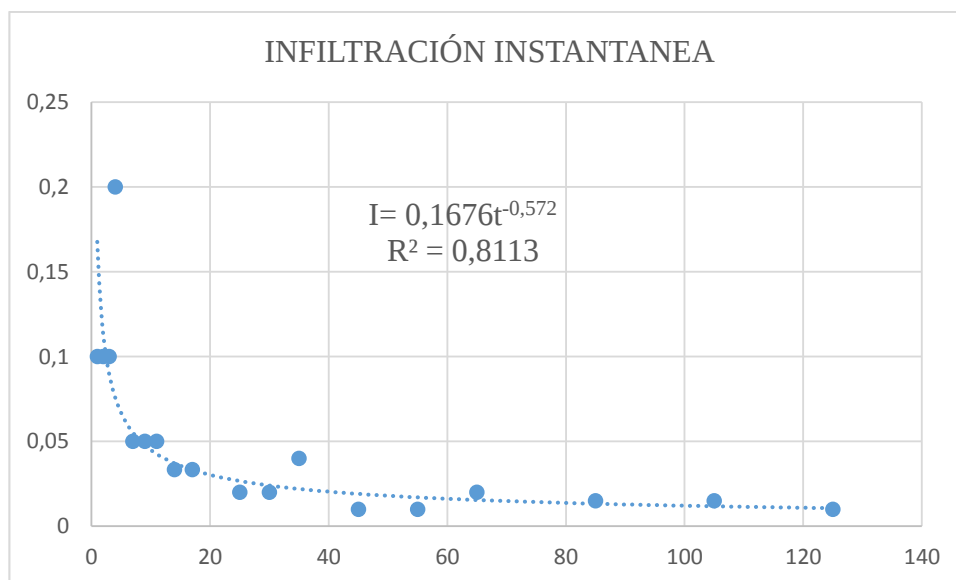
La infiltración básica en la llanura aluvial del río Camacho en la terraza intermedia en el lote B (ver cuadro 6), tiene una $I_b = 30 \text{ mm/h}$ (ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (Ver anexo 11).

Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,3212t^{-0,504}$ (Ver cuadro 12), donde:

$$a = 0,3212 \quad b = -0,504 \quad t \rightarrow Tb = 50,4 \text{ min (Ver cuadro 13)}.$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 8 prueba 1 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (T_b) en esta ocasión un $T_b = -100b$ (Ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 50,4 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 14. Punto 2 terraza intermedia lote (B)



La infiltración básica en la llanura aluvial del río Camacho en la terraza intermedia en el lote B (Ver cuadro 6), tiene una $I_b = 12 \text{ mm/h}$ (Ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (Ver anexo 12).

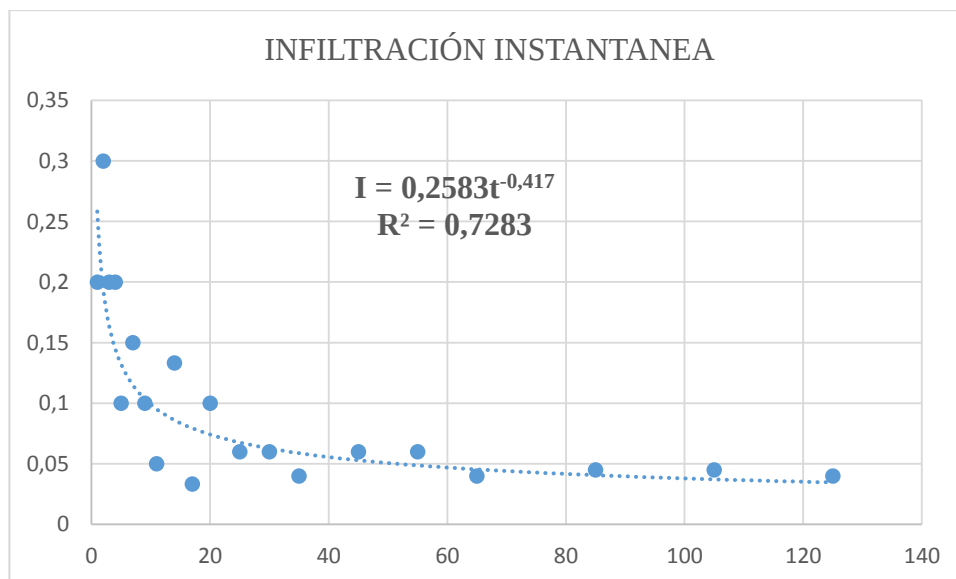
Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,1676t^{-0,572}$ (Ver cuadro 12), donde:

$$a = 0,1676 \quad b = -0,572 \quad t \rightarrow Tb = 57,2 \text{ min (Ver cuadro 13).}$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 8 prueba 2 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (Tb) en esta ocasión un $Tb = -100b$ (Ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 57,2 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 15. Infiltración instantánea del lote N 9

Punto 1 terraza baja lote (A)



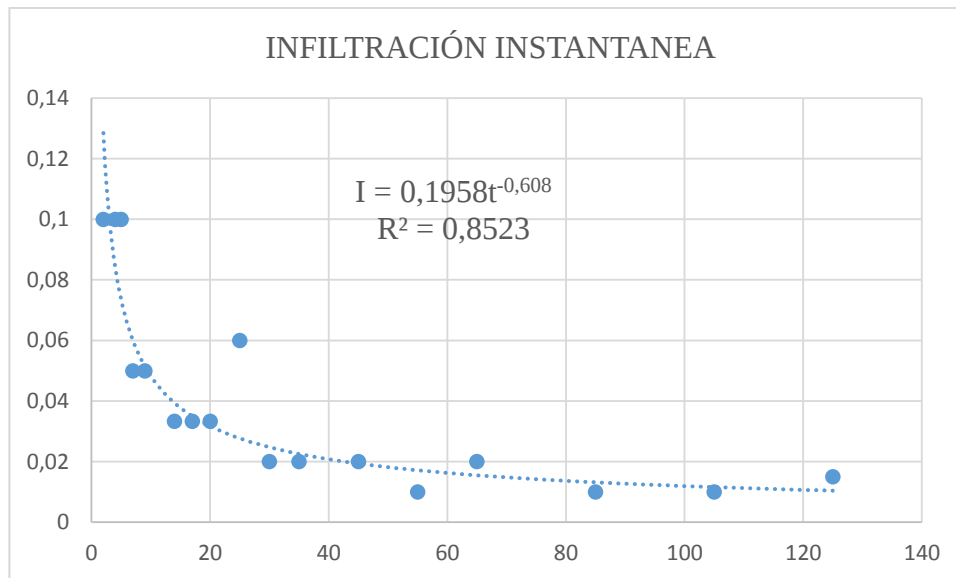
La infiltración básica en la llanura aluvial del río Camacho en la terraza baja en el lote A (Ver cuadro 6), tiene una $I_b = 36 \text{ mm/h}$ (Ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (Ver anexo 13).

Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,2583t^{-0,417}$ (Ver cuadro 12) donde:

$$a = 0,2583 \quad b = -0,417 \quad t \rightarrow T_b = 41,7 \text{ min (Ver cuadro 13).}$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 9 prueba 1 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (T_b) en esta ocasión un $T_b = -100b$ (Ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 41,7 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Grafica 16. Punto 2 terraza baja lote (A)



La infiltración básica en la llanura aluvial del río Camacho en la terraza baja en el lote A (Ver cuadro 6), tiene una $I_b = 12 \text{ mm/h}$ (Ver cuadro 13). La cantidad de datos procesados para la obtención de la curva fueron de 21 datos tomados en campo (Ver anexo 14).

Los valores obtenidos para encontrar la infiltración básica salieron de la ecuación de la infiltración instantánea $0,1958t^{-0,608}$ (Ver cuadro 12), donde:

$$a = 0,1958 \quad b = -0,608 \quad t \rightarrow Tb = 60,8 \text{ min (Ver cuadro 13)}.$$

En la gráfica se puede observar que en el lote 9 prueba 2 la infiltración instantánea se convierte en básica cuando el tiempo (t) es igual al tiempo base (Tb) en esta ocasión un $Tb = -100b$ (Ver anexo 29). La infiltración se hace básica a los 60,8 min donde la infiltración se hace casi constante en relación al tiempo.

Ecuación matemática desarrollada para el permeámetro Guelph

Cuadro 18. Modelo matemático propuesto para aproximar el valor de infiltración básica de los cilindros al permeámetro

Lotes	Infiltración Básica (mm/h) Tb=-100b Cilindro	Infiltración Básica (mm/h) Permeámetro
2	201	17,91
3	117	15,81
4	54	17,37
5	27	6,318
7	39	7,65
8	21	10,68
9	24	6,45
Suma	483	82,188
Promedio	69	11,74
Valor próximo	11,73 	11,74

$$\frac{69mm/h}{11,74mm/h} = 5,88$$

Factor de corrección

$$F(c) = \frac{1}{5,88} = 0,17$$

Valor corregido o valor próximo

$$Vc = Ib(cilindro) \times F(c)$$

$$Vc = 69mm/h \times 0,17 = 11,73mm/h$$

Se procedió a encontrar el promedio de la infiltración básica de todos los lotes del CECH de ambos métodos esto con el fin de aproximar el valor de la infiltración básica

del cilindro al permeámetro, el valor obtenido 69 mm/h se multiplico por el factor de corrección $Fc = 0,17$ que nos dio un valor de 11,73 mm/h que es un valor 100% próximo al valor del permeámetro.

Ecuación matemática

Ecuación 1 aproximación de los valores de la infiltración básica del cilindro al permeámetro:

$$y = a \times b$$

Ecuación 2 aproximación de los valores de la infiltración básica del permeámetro al cilindro:

$$y = \frac{a}{b}$$

Este modelo matemático desarrollado nos permite aproximar los valores de infiltración básica del cilindro al permeámetro o viceversa simplemente cambiando los valores de la infiltración básica y despejando la variable b (factor de corrección), esto con el fin de obtener una mejor comparación de datos.

Los modelos matemáticos propuestos para aproximar el valor de la infiltración básica del cilindro al permeámetro nos dan un valor de aproximación del 100% próximo al del permeámetro. Esto nos indica que el permeámetro es una herramienta ideal para el cálculo de la infiltración básica (I_b), donde la tasa de cambio de agua es más constante y se puede minimizar el error en las lecturas.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se llegó a medir la tasa de infiltración con el cilindro y el permeámetro en dos distintos puntos por cada lote, donde los valores obtenidos con el cilindro nos dan resultados que nos dice que el lote 4 ($I_b = 54\text{mm/h}$), lote 5 ($I_b = 27\text{mm/h}$), lote 7 ($I_b = 39\text{mm/h}$), lote 8 ($I_b = 21\text{mm/h}$) y lote 9 ($I_b = 24\text{mm/h}$) están en la categoría clase 4, infiltración moderada según la tabla de interpretación de resultados de la infiltración básica, mientras que el lote 3 ($I_b = 117\text{mm/h}$) entra en la categoría clase 5 moderadamente rápida y el lote 2 ($I_b = 201\text{mm/h}$) en la categoría clase 6 infiltración rápida.
- En cada lote del CECH se determinó la permeabilidad, donde se obtuvieron los resultados de la infiltración básica con valores de: lote 2 $I_b = 17,91\text{mm/h}$, lote 3 $I_b = 15,81\text{mm/h}$, lote 4 $I_b = 17,37\text{mm/h}$, lote 5 $I_b = 6,32\text{mm/h}$, lote 7 ($I_b = 7,65$), lote 8 $I_b = 10,68\text{mm/h}$ y lote 9 $I_b = 6,45\text{mm/h}$, todos los lotes entran en una categoría clase 3 una infiltración moderadamente lenta, según la tabla de interpretación de resultados de la infiltración básica, esto debido a la altura de agua en el pozo que es constante.
- Los resultados obtenidos con ambos métodos nos muestran una importante dispersión, con los valores de la infiltración básica obtenida con los anillo infiltrómetro y el Permeámetro de Guelph, según la tabla de comparación de resultados de la infiltración básica. Con el uso del cilindro los lotes 4, 5, 7, 8 y 9 están en la categoría clase 4, que son suelos adecuados para riego por superficie, mientras que el lote 3 entra en la categoría clase 5 y el lote 2 en la categoría clase 6 que suelos inadecuados para riego por superficie, requieren riego localizado. Con el uso del permeámetro los resultados de la tasa de infiltración son un poco bajos, los resultados nos indican que los lotes 2, 3, 4, 5, 7, 8 y 9 están en una categoría clase 3, que son suelos óptimos para riego por superficie.

Los datos generados nos indican que los lotes del CECH presentan diferentes valores de infiltración. Por lo cual los lotes 4, 5, 7, 8, y 9 presentan una

infiltración moderada, que su adecuado riego es por superficie. Por lo cual deben realizar trabajos de subsolado e implementación de MO para mejorar la infiltración, los datos ayudaran a estimar los tiempos de riego necesarios para las parcelas. En los lotes 2 y 3 son suelos no aptos para riego por superficie, precisa riego localizado. Esta información ayudara a establecer el tiempo de riego óptimo.

- Los modelos matemáticos propuestos para comparar la infiltración básica calculada con el cilindro con un valor promedio de 69mm/h y el permeámetro con un valor promedio de 11,74mm/h son valores distintos en comparación, según la tabla de interpretación de resultados de la infiltración básica, pero si aplicamos el modelo matemático desarrollado al valor promedio de la infiltración básica del cilindro nos da un valor de 11,73mm/h dándonos un valor comparable al del permeámetro con una aproximación del 100 %.

Recomendaciones

Mediante las pruebas realizadas y los resultados de campo se recomienda lo siguiente:

- Se recomienda usar ésta información de los resultados obtenidos de la infiltración básica del “Centro Experimental de Chocloca” para calcular los requerimientos hídricos de los diferentes cultivos y diseñar o mejorar los sistemas riego tecnificados.
- Debido a las diferentes clases texturales del CECH se recomienda según los cilindros que en los lotes 2 y 3 se debe mejorar la capacidad de retención de agua ya que no es apto para riego por superficie ya que su infiltración básica es de 201mm/h del lote 2 y 117 mm/h del lote 3.
- Se sugiere la necesidad de implementar prácticas de manejo adaptadas a las características de cada lote del CECH. Esto con el fin de utilizar estos datos obtenidos para fines de riego en las diferentes parcelas.
- Realizar más estudios con las metodologías propuestas en diferentes tipos de suelos, distintas profundidades y a distintas alturas de agua en el poso.
- De acuerdo con los resultados obtenidos con la metodología planteada y las conclusiones se recomienda usar el permeámetro de Guelph para el cálculo de la infiltración básica.
- Se recomienda usar el permeámetro Guelph para realizar las pruebas de infiltración ya que el método de los anillos Infiltrómetro de doble cilindro no es un implemento de fácil instalación y movilización. Utilizar este equipo requiere una cantidad promedio de 40 a 50 litros de agua por cada prueba, teniendo en cuenta que en el CECH se debió transportar el agua en galones con ayuda de una carreta para poder realizar las pruebas infiltración.
- El uso del permeámetro de Guelph es un implemento de fácil traslado e instalación, ya que este requiere alrededor de 3 litros de agua aproximadamente con una movilidad mucho mayor a los anillos infiltrómetro donde se evidencia que los valores obtenidos son recomendables para el cálculo de la infiltración básica.

